

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Уральское отделение Российской академии наук

«Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» –
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук



XXIII ЗИМНЯЯ ШКОЛА ПО МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД

Тезисы докладов



Пермь, 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Уральское отделение Российской академии наук

«Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» – филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред

Тезисы докладов

13-17 февраля 2023 г.

Пермь, 2023

УДК [539.3+532.5](063)

XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 13 – 17 февраля 2023г.
Тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023г. – 392с.
ISBN 978-5-6048400-4-7

Представлены тезисы докладов XXIII Зимней школы по механике сплошных сред, проходившей на базе «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук с 13 по 17 февраля 2023 г.

Сборник отражает тематику Школы и содержит результаты исследований по актуальным проблемам вычислительной механики сплошных сред, связанным задачам механики деформируемого твердого тела, физике и механике мезо- и наноструктурных систем, функциональным материалам, конвекции, гидродинамической устойчивости и турбулентности, гидродинамике не-newтоновских жидкостей и жидкостей с особыми свойствами, горной механике, биомеханике и биофизике.

Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны научным работникам, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-6048400-4-7

XXIII Зимняя школа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края (соглашение от 13 января 2023 года № С-26/097.1)

и в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

Издается по решению Ученого совета «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Ответственный за выпуск: Н.А. Юрлова

© ИМСС УрО РАН, 2023 г.

© Авторы, 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Агеева М.В., Демин В.А., Демина Т.В., Зинурова В.Э. О механизме доставки кремния в ходе высокотемпературного силицирования	19
2. Аглетдинов Э.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Бурмистров Е.В., Лукин С.В., Никитюк А.С., Уваров С.В., Чудинов В.В., Наймарк О.Б. Механизмы разрушения горных пород в условиях множественных метастабильных состояний, индуцированных дефектами.....	20
3. Айзикович С.М., Лапина П.А., Зеленцов В.Б., Волков С.С. Современный метод исследования эквивалентности различных моделей неоднородного упругого полупространства и неоднородного упругого слоя.....	21
4. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Нелинейные волны в ривулете, стекающем по вертикальной пластине.....	22
5. Алабужев А.А. Динамика зажатого пузырька с учетом гистерезиса краевого угла.....	23
6. Амбаров А.В., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Характерные времена релаксации магнитных моментов взаимодействующих обездвиженных дипольных частиц	24
7. Андреева А.И. Влияние состава нефти на оптимальные режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты.....	25
8. Андрейко С.С., Мальцев В.М., Аникин В.В. Математическое моделирование процесса формирования импульса взрыва в скважинах разного диаметра с учётом интенсивности дробления.....	26
9. Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н. О колебаниях кольца, подкрепленного нитями одностороннего действия.....	27
10. Анисимов Р.А., Ломова М.В., Кочубей В.И., Янина И.Ю. Модель фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии на основе апконверсионных наночастиц.....	28
11. Артамонова Н.Б., Шешенин С.В. Математическое исследование задачи консолидации. 29	
12. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Влияние коэффициента поверхностного натяжения на динамику осаждения кластера капель	30
13. Архипов В.А., Богданов С., Борзенко Е.И., Усанина А.С. Экспериментальное исследование влияния поверхностно-активного вещества на форму и скорость всплытия группы монодисперсных пузырьков.....	31
14. Архипов В.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г. Влияние коэффициента поверхностного натяжения на дисперсность капель в факеле распыла форсунки	32
15. Балахнин А.Н., Уваров С.В., Банникова И.А., Вшивков А.Н., Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование влияния однократного лазерного нагружения на развитие внутренней поврежденности материала мишеней	33
16. Балдин М.Н., Кондратьев Н.С., Безверхий Д.С. Моделирование коалесценции с применением многоуровневой физической модели.....	34
17. Банников М.В., Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Игнатова А.М., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Анализ поврежденности полимерных композиционных материалов при циклическом нагружении на основе метода корреляции цифровых изображений (DIC) и рентгеновской томографии	35
18. Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В. Автомодельные закономерности деформирования и разрушения жидкостей при импульсном нагружении....	36
19. Банщиков С.И., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д., Халилов Р.И., Колесниченко И.В. Экспериментальная установка для изучения взаимодействия транзитного и вихревого течений жидкого металла.....	37
20. Барях А.А., Девятков С.Ю., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П. Анализ деформаций земной поверхности при столбовой системе отработки калийных руд	38
21. Баяндин Ю.В., Банников М.В., Головин М.С., Уваров С.В. Определение эффективных модулей упругости и верификация моделей деформирования и разрушения композитов с повреждениями	39

22. Баяндин Ю.В., Ефремов Д.В., Банникова И.А. Экспериментальное исследование реологических свойств растворов вязкоупругих ПАВ в широком диапазоне скоростей сдвига	40
23. Белавина Е.А., Бердюгин Д.А., Ерпулев А.А., Пятницкая Н.Ю. Исследование совместного влияния поперечного магнитного поля и свободной конвекции на теплогидравлику и структуру течения	41
24. Белова О.Н., Степанова Л.В. Анализ распределений напряжений, ассоциированных с вершиной трещины с помощью атомистического и конечно-элементного моделирования ...	42
25. Белоножко Д.Ф. О ряби Фарадея на поверхности горизонтального слоя стратифицированной жидкости.....	43
26. Белошапка В.Я. Механизм перестройки малых ГЦК кристаллов в икосаэдрические структуры.....	44
27. Беляев А.К., Полякова О.Р., Товстик Т.П. Влияние второго резонанса продольных колебаний на устойчивость обобщенного маятника Капицы	45
28. Бердников В.С. Общие закономерности конвективного теплообмена в методах направленной кристаллизации расплавов	46
29. Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Силовые взаимодействия в паре нелинейно намагничивающихся частиц	47
30. Богачев И.В., Недин Р.Д. Моделирование решетчатой пластинки склеры глаза с учетом предварительных напряжений, вызванных внутриглазным давлением.....	48
31. Бондаренко А.А., Ельтищев В.А., Колесниченко И.В. Анализ границы расплавленной электропроводной среды на основе индукционных принципов	49
32. Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В. Собственные колебания композитных эллиптических цилиндрических оболочек с жидкостью.....	50
33. Брацун Д.А., Ступникова А.В., Костарев К.В. Устойчивость активной среды насыщенной микророботами.....	51
34. Брюханов И.А. Исследование влияния дислокаций и температуры на кинетику пластической деформации и разрушения в кристаллах меди методом молекулярной динамики	52
35. Бублик С.А., Семин М.А. Математическое моделирование тепло- и массопереноса при искусственном замораживании минерализованных грунтов	53
36. Бурмистрова О.С., Никитюк А.С., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Исследование статистико-термодинамической модели ДНК при различных внешних условиях	54
37. Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Фрик П.Г., Сухановский А.Н. Динамика свободноплавающего тела в условии естественной конвекции при радиационном нагреве...	55
38. Васильев А.Ю., Степанов Р.А. Маломодовая модель конвективной турбулентности в случае свободной верхней границы	56
39. Вассерман И.Н. Моделирование электрических процессов в структурно-неоднородном деформируемом миокарде.....	57
40. Веденеев В.В., Никитин Н.В. Управление абсолютной и конвективной неустойчивостью струи.....	58
41. Вергелес С.С., Парфеньев В.М., Филатов С.В., Тумачёв Д.Д. Геострофические когерентные вихри в турбулентном потоке вращающейся жидкости.....	59
42. Вильдеман В.Э., Кочнева Я.В. Моделирование процессов деформирования тел с учетом закритической стадии деформирования материала.....	60
43. Вильдеман В.Э., Кучуков А.М., Лунегова Е.М., Мугатаров А.И., Староверов О.А., Струнгарь Е.М., Чеботарева Е.А. Исследование процессов накопления повреждений в стеклопластиках при двухосных циклических воздействиях	61
44. Виндокуров И.В., Ташкинов М.А., Зильбершмидт В.В. Влияние термической обработки на упругие свойства и вязкость разрушения образцов из полиэфирэфиркетона	62
45. Витохин Е.Ю. Определение НДС арочной бетонной плотины при сейсмических воздействиях.....	63

46. Власова О.А. Подвес цилиндрического тела в жидкости вблизи границы, совершающей азимутальные колебания на фоне равномерного вращения	64
47. Власова О.А., Дьякова В.В., Козлов В.Г. Неустойчивость осциллирующей границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в щелевом канале. Роль безразмерной частоты	65
48. Власова О.А., Полежаев Д.А. Осредненные течения вблизи колеблющейся границы двух жидкостей в длинном щелевом канале	66
49. Волков Г.А., Петров Ю.В. Энергетические особенности разрушения сплошных сред при импульсном нагружении	67
50. Володин И.В., Алабужев А.А. Осредненная динамика тонкой пленки феррожидкости в вертикальном вибрационном поле	68
51. Вшивкова А.А., Швейкин А.И., Трусов П.В. Комплексный учет изменения температуры и скорости деформации в многоуровневых конститутивных моделях поликристаллических металлов	69
52. Вяткин Я.В. Прямая модель физической теории пластичности: применение для анализа влияния свободных поверхностей на деформирование моно- и поликристаллических образцов	70
53. Гаврилов А.А. Моделирование турбулентных течений неньютоновских жидкостей.....	71
54. Гареев Л.Р., Ашуров Д.А., Веденеев В.В., Иванов О.О. Изучение устойчивости круглой затопленной струи.....	72
55. Гаришин О.К., Свистков А.Л., Возняковский А.П., Цыпкина И.М., Неверовская А.Ю., Шадрин В.В. Механические свойства эластомеров, наполненных углеродными нанотрубками	73
56. Гаришин О.К., Шадрин В.В. Исследование развития макроразрыва в эластомерных нанокompозитах с 1D, 2D и 3D наполнителями.....	74
57. Гачегова Е.А., Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Плехов О.А. Влияние характеристик поглощающего слоя на эффективность лазерной ударной проковки.....	75
58. Герасимов О.В., Рахматулин Р.Р., Саченков О.А. Расчёт прочности элементов негомогенных сред на основе данных компьютерной томографии.....	76
59. Герасимов Р.М. Математическая модель неупругого деформирования для описания эффекта прерывистой пластичности.....	77
60. Герасимов Р.М., Чечулина Е.А., Грибов Д.С. Обработка результатов экспериментов с использованием вейвлет-анализа	78
61. Герцен Т.А., Любимова Н.Ю. Задача о проветривании тупиковых камер калийного рудника.....	79
62. Гладких П.А., Глебов М.А. Влияние неопределенности выбора активных систем скольжения в моделях типа Тейлора-Бишопа-Хилла на результаты упругопластического деформирования поликристаллов (на примере материалов с ГЦК и ОЦК решетками).....	80
63. Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С. Влияние формы нагретых горизонтальных пластин на структуру конвективных течений	81
64. Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С. Исследование влияния формы нагретых горизонтальных пластин на процесс образования конвективных течений ..	82
65. Голдобин Д.С., Долматова А.В. Формирование пузырьковых горизонтов в затопленной пористой среде при колебании температуры поверхности	83
66. Голдобин Д.С., Клименко Л.С. Формализм псевдокумулянтов и нелоренцевские распределения в задачах статистической физики.....	84
67. Голдобин Д.С., Клименко Л.С., Самойлова А.Е. Тепловая конвекция в донных отложениях	85
68. Гольцов Е.С., Труфанова Н.М. Математическая модель процессов теплопереноса при промывке нефтяной скважины через полые штанги.....	86
69. Гончаров М.М., Макарихин И.Ю., Голдобин А.А., Сафарян К.А. Влияние эксцентрисности частично нагретых цилиндров на устойчивость конвективного течения и эффективность конвективного теплообмена.....	87

70. Гончаров М.М., Макарихин И.Ю., Голдобин А.А., Сафарян К.А. Исследование конвективного теплообмена в узком слое в зазоре между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами с частичным нагревом внутреннего	88
71. Гордеев А.Н., Савиковский А.В., Антонова О.В., Михайлов А.А., Семенов А.С. Особенности вычисления J-интеграла для тел с трещиной при неоднородном температурном поле.....	89
72. Горячева И.Г., Мещерякова А.Р. Исследование влияния свойств покрытий на контактные характеристики и изнашивание при качении с проскальзыванием	90
73. Грибов Д.С., Трусов П.В. Трёхуровневая модель для описания неупругого деформирования металлов с различной энергией дефекта упаковки.....	91
74. Гурджиев А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Исследование влияния дополнительных вибраций кручения на закритическую стадию деформирования волокнистого полимерного композиционного материала.....	92
75. Гусев Г.Н., Барях А.А., Шардаков И.Н. Исследование закономерностей деформационного поведения строительных конструкций в зонах техногенного воздействия	93
76. Гусев Г.Н., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Задача о динамическом отклике железобетонной конструкции на импульсное локализованное воздействие	94
77. Гусев Г.Н., Епин В.В., Корепанов В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Сравнение различных схем крепления вибрационного датчика к грунту в условиях отрицательных температур	95
78. Дектерев Д.А., Мешкова В.Д. Применение методов трассерной визуализации для исследования аэродинамики модельных групп зданий	96
79. Демин В.А., Петухов М.И., Пономарёв Р.С. Теоретическое исследование динамики ионного пограничного слоя при протонировании ниобата лития	97
80. Денисова И.В., Солонников В.А. Теория устойчивости для задачи вращения двухфазной капли.....	98
81. Денисова М.О., Костарев К.Г. Особенности поглощения ПАВ каплей из его однородного раствора.....	99
82. Денисюк Е.Я. Механика полимерных гелей и теория упругости	100
83. Дмитриев С.В., Ильгамов М.А., Павлов И.С., Савин А.В. Механика углеродных наноматериалов	101
84. Добриян В.В. Нейросети в нелинейной динамике балок Эйлера-Бернулли.....	102
85. Добросердова А.Б., Пьянзина Е.С., Канторович С.С. Магнитные и структурные свойства магнитных гелей типа «Core-shell»	103
86. Долгих Д.А., Ташкинов М.А., Зильбершмидт В.В. Численный анализ механического поведения аддитивно изготовленных полимерных экзопротезов, армированных углеродными волокнами	104
87. Дрёмин В.В. Оптическая диагностика сосудистых и метаболических осложнений сахарного диабета	105
88. Дудин Д.С., Келлер И.Э. Времена релаксации связанных диффузионных и реологических процессов в среде с микроструктурой	106
89. Дунченкин П.В., Яковлева Т.В. Метод адгезивов при создании многослойных пакетов nano-пластинок Жермен-Лагранжа.....	107
90. Дьякова В.В., Полежаев Д.А. Устойчивость границы между жидкостью и сыпучей средой во вращающемся горизонтальном цилиндре	108
91. Евграфова А.В. Распространение условной примеси в пределах городского ландшафта	109
92. Евграфова А.В., Ветров А.Л. Анализ температуры поверхности городов Пермь и Красноярск на основе спутниковых данных.....	110

93. Еленская Н.В., Виндокуров И.В., Пирогова Ю.В., Ташкинов М.А. Численное и экспериментальное исследование деформационного поведения аддитивно изготовленных полимерных функционально-градиентных решетчатых структур	111
94. Елфимова Е.А., Кузнецов М.А., Русанов М.С., Зверев В.С. Влияние подмагничивающего постоянного поля на динамические свойства системы взаимодействующих подвижных магнитных частиц	112
95. Ельтищев В.А., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д. Индукционный датчик измерения концентрации примесей в электропроводящих средах.....	113
96. Еремеев В.А. Моделирование решетчатых материалов в рамках модели континуума Коссера.....	114
97. Еремин А.А., Варелджан М.В., Глушков Е.В., Глушкова Н.В. Двухэтапная вычислительная схема для моделирования возбуждения упругих волн ультразвуковым пьезопреобразователем.....	115
98. Ермакова А.С., Пещеренко С.Н. Моделирование нестационарной добычи однофазной изотермической жидкости.....	116
99. Зайцев А.В., Фукалов А.А. Аналитические решения задач о равновесии упругих ортотропных тел с осевой симметрией, находящихся в поле гравитационных сил, и их приложения к задачам геомеханики	117
100. Зайцев В.Ю. Оптическая когерентная томография: новый инструмент для визуализации микротока, деформаций биотканей и характеризования их упругих свойств	118
101. Зайцев Д.В., Куклина А.А., Меженев М.Е., Панфилов П.Е. Микроструктура и прочностные свойства дентина зубов у пациентов преклонного возраста.....	119
102. Засимова М.А., Красикова А.Д. Регулирование автоколебаний турбулентной струи, распространяющейся в узкой прямоугольной полости	120
103. Засимова М.А., Рис В.В., Иванов Н.Г., Тихомиров А.Е. Численное моделирование распространения каплесодержащей струи при однократном кашле	121
104. Зверев В.С., Иванов А.О., Елфимова Е.А. Магнитогранулометрический анализ статических и динамических характеристик феррожидкости.....	122
105. Зверев В.С., Новак Е.В., Пьянзина Е.С., Добросердова А.Б., Иванов А.О. Статические и динамические магнитные свойства феррожидкостей с эллипсоидальными наночастицами	123
106. Зданчук Е.В., Лалин В.В. Поверхности разрыва в нелинейной и линейной редуцированной среде Коссера.....	124
107. Земсков А.В., Ле Ван Хао Нестационарные термомехано-dиффузионные колебания балки Бернулли-Эйлера на винклеровском основании.....	125
108. Зимасова А.Р., Козлов В.Г. Динамика двух жидкостей с высоким контрастом вязкостей в неравномерно вращающемся горизонтальном цилиндре	126
109. Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю. К теории магнитовязкого эффекта в полидисперсных феррожидкостях	127
110. Зуев А.Л., Мишланов В.Ю. Применение импедансометрической методики для электронного мониторинга респираторных заболеваний.....	128
111. Зуев А.Л., Мишланов В.Ю., Криштоп В.В., Ременникова М.В., Гаркушин А.А., Антипова А.А., Никитина К.А., Благин Е. Разработка программно-аппаратного комплекса для удаленного мониторинга состава биологической жидкости методом измерения биоэлектрического импеданса	129
112. Иванов А.О., Кэмп Ф.Дж. Релаксация намагниченности в полидисперсных феррожидкостях	130
113. Иванов А.С., Косков М.А., Сомов С.А. Аппаратурное оформление экспериментального исследования динамики конечного объема феррожидкости в коаксиальном зазоре при поступательном движении стенок.....	131
114. Иванов А.С., Пшеничников А.Ф. О соотношении поверхностных и объемных сил, действующих на твердое тело в магнитной жидкости.....	132

115.Иванов М.В., Михайлов А.А., Антонова О.В., Кузьмин В.А. Математическое моделирование поведения слоистых панелей с тетраэдральным наполнителем с применением принципов разномодульной теории упругости	133
116.Иванов О.О., Гареев Л.Р., Ашуров Д.А., Веденеев В.В. О влиянии немодального возмущения на затопленную струю	134
117.Иванов П.С. Сопоставление прогнозов перемещений арочно-гравитационной плотины, полученных откалиброванной конечно-элементной и нейросетевой моделями.....	135
118.Иванов Я.Н., Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Морозов И.А., Беляев И.Ю. Определение модуля упругости карбонизированного слоя, сформированного на полиуретане ионно-плазменным методом.....	136
119.Иванцов А.О., Любимова Т.П., Исаевич А.Г., Семин М.А., Суханов А.Е. Моделирование динамики газозадушенной смеси в тупиковой горной выработке при работе комбайнового комплекса.....	137
120.Ивченко Н.А., Вергелес С.С. Пространственное распределение пассивного скаляра в двумерном сдвиговом течении с флуктуациями	138
121.Игнатов А.А., Столбов О.В., Родионова В.В. Расчет деформаций структурированного магнитоактивного эластомера с магнитожесткими включениями в 2D постановке	139
122.Игнатова А.М., Асташина Н.Б., Роготнев А.А., Логинова Н.П., Наймарк О.Б., Рапекта С.И. Оценка динамики минерализации костной ткани в процессе постимплантационного остеогенеза при установке имплантата из углерод-углеродного материала	140
123.Игнатова А.М., Верещагин В.В., Наймарк О.Б. Принципы определения исчисляемых структурных параметров литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов в условиях неравновесной кристаллизации методом анализа изображений	141
124.Изюмов Р.И., Осоргина И.В., Пелевин А.Г., Свистков А.Л., Чудинов В.С. Влияние технологии изготовления полиуретановых образцов на трещинообразование в углеродном слое	142
125.Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Плехов О.А. Анализ влияния лазерной ударной обработки на термодинамику и кинетику усталостных трещин.....	143
126.Илларионов Е.А., Соколов Д.Д. Относительная эффективность трех механизмов роста векторных полей в случайной среде	144
127.Ильиных А.В., Паньков А.М., Феклистова Е.В., Струнгарь Е.М., Пермяков Г.Л. Анализ вопросов реализации упругих свойств наплавленной нержавеющей стали 316LSi	145
128.Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю. Некоторые подходы к устранению остаточных деформаций изделий из композиционных материалов.....	146
129.Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Бекмансуров М.Р. Об одной методике численного моделирования лазерной порошковой наплавки	147
130.Исаев С.А. Управление вихревыми структурами в аэродинамике и теплофизике	148
131.Кабанова П.К., Фрейдин А.Б. Моделирование эволюции областей новой фазы в упругом теле	149
132.Калинин Н.А., Быков А.В., Ветров А.Л. Прогноз степени суровости погоды в феврале 2019 года в городе Красноярск по данным модели WRF	150
133.Калуцкий Л.А., Крысько В.А., Крысько А.В. Математическая модель двояко изогнутых гибких функционально-градиентных прямоугольных в плане оболочек с равномерной пористостью и анализ их напряженно деформированного состояния	151
134.Каменских А.А., Крысина А.С. Анализ влияния характера сопряжения полимерной прослойки на параметры контакта при взаимодействии со стальной поверхностью	152
135.Каменских А.А., Николаев А.В., Носов Ю.О., Аль-Раммахи А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния шахтной изолирующей перемычки	153
136.Каменских А.А., Носов Ю.О. Анализ термомеханических свойств пастообразных смазочных материалов применяемых в мостостроении	154

137.Каменских А.А., Носов Ю.О., Струкова В.И. Численное моделирование деформационного поведения полимерной прослойки сферической опорной части при разных схемах заполнения углублениями под смазку.....	155
138.Каменских А.А., Панькова А.П. Исследование деформационного поведения контактного узла опорной части под действием нагрузок от мостового пролета.....	156
139.Камшилин А.А. Оптические методы оценки васкулярной системы in-vivo: влияние длины волны и когерентности освещения.....	157
140.Карасев Т.О., Перминов А.В. Моделирование конвекции жидкого магния в печи титанового реактора с учетом эффективных граничных условий.....	158
141.Карасева У.П., Фрейдин А.Б. Релаксация напряжений в моделях нелинейной вязкости с изменяющимся коэффициентом вязкости.....	159
142.Карра Ж.-Б. , Гаврилов Н.В., Черданцев А.В., Шмакова Н.Д., Ерманюк Е.В. Влияние угла раствора и скорости падения на захват воздуха при соударении конуса с жидкостью.....	160
143.Келлер И.Э., Адамов А.А., Петухов Д.С., Кузьминых В.С., Патраков И.М., Острер С.Г., Гракович П.Н., Шилько И.С. Сравнение механических и трибологических характеристик ряда наполненных композитов на основе ПТФЭ для использования в узлах трения с контактными давлениями свыше 60 МПа.....	161
144.Кислицын В.Д., Шадрин В.В., Свистков А.Л. Моделирование эффекта размягчения Маллинза в равновесном и диссипативном слагаемых тензора напряжений Коши.....	162
145.Князев Д.В. Влияние теплообмена на осесимметричное течение Куэтта-Пуазейля термовязкой жидкости.....	163
146.Козлов В.Г., Звягинцева Е.А., Кудымова Е.М., Романец В.Я. Движение легкой свободной сферы и жидкости во вращающемся вертикальном цилиндре конечной длины.....	164
147.Козлов Н.В., Мизёв А.И. Изучение ультразвукового разделения водно-масляной эмульсии оптическими методами.....	165
148.Козлов Н.В., Мошева Е.А., Панькова Н.В. Исследование влияния горизонтальных вибраций на устойчивость границы смешивающихся жидкостей.....	166
149.Колесникова В.Г., Андреев Н.В., Омельянчик А.С., Солдатов И.В., Шаффер Р., Родионова В.В. Магнитные и структурные особенности ферромагнитных микропроводов.....	167
150.Колесниченко И.В., Халилов Р.И. Определение электропроводности жидкого металла с помощью характеристик производительности электромагнитного насоса.....	168
151.Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д. Процессы в цилиндрической ячейке с расплавленным металлом в индукторе «ТОПАЗ».....	169
152.Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д. Эволюция неоднородностей течения жидкого металла, созданных в транзитном потоке электромагнитным индуктором.....	170
153.Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. Нелинейные режимы конвекции в двойном воздушно-пористом слое с внутренним тепловыделением.....	171
154.Кондратьев Н.С., Подседерцев А.Н., Балдин М.Н., Безверхий Д.С. Многоуровневая модель динамической рекристаллизации с учетом эволюции субзеренной структуры.....	172
155.Корелин А.А., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процесса тепломассопереноса при вулканизации изоляции кабелей на среднее напряжение.....	173
156.Коровайцева Е.А. Особенности алгоритма решения задач статики оболочек вращения при больших деформациях.....	174
157.Костарев К.Г., Торохова С.В. Выбор системы жидкостей для лабораторного моделирования массообменных процессов в условиях микрогравитации: эффект контракции.....	175
158.Котельникова Н.В., Князев Н.А. Многоуровневое описание деформирования и разрушения металлов с использованием фрактальной размерности границ зерен.....	176
159.Красников Г.В., Мизева И.А. Взаимосвязь уровня кислородной сатурации и перфузии ткани кровью для различных структурных звеньев микроциркуляторного русла кожи человека.....	177

160.Красняков И.В., Брацун Д.А. Математическое моделирование роста эпителиальной ткани в различных по геометрии порах Скаффолда	178
161.Кречин А.Н., Яковлева Т.В. Нелинейная динамика пористых функционально-градиентных нанобалок Эйлера-Бернулли, Тимошенко, Шереметьева-Пелеха	179
162.Кривилев М.Д. Многофакторные исследования процессов смачивания при развитии технологии пайки	180
163.Кружилин В.С., Яковлева Т.В. Контактная динамика пористых балок Эйлера-Бернулли... ..	181
164.Крыласова О.С., Поперечный И.С. Продольная динамическая восприимчивость антиферромагнитных наночастиц с суперпарамагнитными свойствами	182
165.Крылова Е.Ю., Саркисян С.О. Об одной электромеханической задаче для прямоугольного листа графена	183
166.Крылова Е.Ю., Синичкина А.О. Нелинейные собственные колебания сетчатой пластины в электрическом поле	184
167.Кузнецов А.А., Новак Е.В., Пьянзина Е.С., Канторович С.С. Исследование структурных свойств суспензий магнитных нанокompозитных частицы типа «multicore particle»	185
168.Кузнецова О.Б., Соловьева А.Ю., Иванов А.О. Математическая модель модифицированного среднего поля 2-го порядка: динамическая начальная магнитная восприимчивость феррожидкостей	186
169.Кузнецова Ю.Л. Эволюция спектра размеров аэрозольных водорастворимых частиц... ..	187
170.Курганский М.В. Инерционная неустойчивость периодического по времени течения Колмогорова с точным учетом силы Кориолиса	188
171.Курмоярцева К.А. Прямая дислокационно-ориентированная модель для описания деформирования и разрушения металлов	189
172.Кучинский М.О., Козлов Н.В. Применение тепловых карт для изучения кавитационной активности в сонохимическом реакторе	190
173.Лалин В.В., Нго Х.Х. Обобщенная точка Коссера. Новые конечные элементы для задач динамики стержневых систем	191
174.Ласковец Е.В. Моделирование трехслойных конвективных течений с испарением в горизонтальном канале на основе точных решений	192
175.Лебедев А.В. Парадоксы динамической восприимчивости коллоидных растворов феррита кобальта	193
176.Левин В.А., Вершинин А.В. САЕ как внедрение фундаментальных результатов механики прочности в промышленное использование. На примере пакета Фидесис и теории многократного наложения больших деформаций	194
177.Ледон Д.Р., Баяндин Ю.В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений и валидация модели деформируемого твердого тела с дефектами	195
178.Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н. Сравнение двух подходов для моделирования пьезоэлементов, подключённых к внешней электрической цепи	196
179.Лесникова Ю.И. О выборе характера сопряжения элементов оптического волокна типа Panda при моделировании технологической пробы	197
180.Лисовенко Д.С. Механические свойства кубических кристаллов с отрицательным коэффициентом Пуассона	198
181.Литвинов В.Л., Литвинова К.В. Применение приближенного метода Канторовича-Галеркина для анализа колебаний механических систем с подвижными границами	199
182.Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Филимонов С.А. Влияние излучения на формирование аэрационного режима в городской застройке	200
183.Лобов Е.С., Добрыднева А.Д., Ташкинов М.А. Влияние наполнителя в виде коротких волокон на механические характеристики акрилонитрила бутадиен стирола для трехмерной печати	201
184.Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д. Возможности электромагнитного воздействия на процесс кристаллизации цилиндрических слитков в установке топаз	202

185.Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д. Экспериментальное исследование нестандартных механизмов управления процессом направленной кристаллизации цветных металлов.....	203
186.Лучинкин Н.А., Разуванов Н.Г., Полянская О.Н. Исследование МГД и теплообмена при течении жидкого металла в комбинированном канале в системе двойного охлаждения	204
187.Лысенко Ф.П., Говорухин В.Н. Метод идентификации плоского вихря по значениям вектора скорости в конечном наборе точек	205
188.Любимова Н.Ю., Нуруллаев Э.М., Герцен Т.А. Параметры структуры и фракционный состав наполнителя морозостойких полимерных композитов на основе низко- и высокомолекулярных каучуков	206
189.Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомоллов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А. Влияние плотностной стратификации водных масс на особенности гидродинамики водоемов, расположенных в зонах активного техногенеза	207
190.Любимова Т.П., Шубенков И.С. Нелинейные режимы тепловой конвекции в наклонном слое пористой среды, насыщенной жидкостью, при вертикальном градиенте температуры	208
191.Макаревич Е.С., Подседерцев А.Н., Кондратьев Н.С., Трусков П.В. Вопросы моделирования мартенситного перехода в прямой физически-ориентированной конститутивной модели.....	209
192.Макаренко Н.И. Волновые модели глубоководной гидродинамики.....	210
193.Максеев А.Е., Жигалов М.В., Крысько В.А. Идентификация внутренних трещин в трехмерной теории пластин	211
194.Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В. Метод температурных корреляций для измерения расхода жидкого натрия	212
195.Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В. Развитая турбулентность в потоках жидкого металла в электромагнитном перемешивателе.....	213
196.Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Халилов Р.И., Колесниченко И.В. Большой оловянно-свинцовый стенд ИМСС УрО РАН.....	214
197.Марышев Б.С., Клименко Л.С. Влияние модуляции потока на конвективную устойчивость течения через горизонтальный слой пористой среды с учетом закупорки.....	215
198.Мержоева Л.Р., Тихвинский Д.В., Паршин Д.В., Чупахин А.П. Гемодинамика бифуркационной аневризмы абдоминального отдела аорты	216
199.Митюшов Е.А., Ламоткин А.Е. Динамика и ресурс универсальных шарниров в карданных передачах	217
200.Морозов И.А., Беляев А.Ю. Атомно-силовая микроскопия поверхностных и подповерхностных свойств полиуретанов с различной температурой отверждения	218
201.Морозова К.Г., Беседина А.Н., Остапчук А.А. Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород.....	219
202.Мохирева К.А., Свистков А.Л. Моделирование вязкоупругого поведения эластомерных материалов в экспериментах со сложным алгоритмом деформирования при конечных деформациях.....	220
203.Мошева Е.А. Выбор системы жидкостей для лабораторного моделирования массообменных процессов в условиях микрогравитации: эффект двойной диффузии	221
204.Мошева Е.А. Смещение неустойчиво стратифицированных жидкостей в условиях развития неустойчивости двойной диффузии в проточном микроканале	222
205.Мошева Е.А., Мизёв А.И., Шмыров А.В. Капиллярные механизмы смещения в микроканалах.....	223
206.Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э. Моделирование процесса деформирования пластины с концентраторами напряжений различной геометрии при учете разупрочнения материала ...	224
207.Мугатаров А.И., Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Описание диаграмм ударной чувствительности углепластика при трехточечном изгибе короткой балки	225
208.Мугинов Р.Р., Пещеренко С.Н., Перминов А.В. Модель движения диагностического снаряда	226

209.Муллахметов М.Н., Лобанов Д.С., Янкин А.С., Мельникова В.А., Чеботарева Е.А. Исследование циклической долговечности конструкционного стеклопластика СТЭФ	227
210.Мурашкин Е.В., Радаев Ю.Н. Ковариантно постоянные тензоры и псевдотензоры в энергетических формах микрополярной механики.....	228
211.Мусихин А.Ю., Зубарев А.Ю. К теории магнитоиндуцированных течений в тромбированных каналах	229
212.Мушанкова К.А., Степанова Л.В. Поля напряжений у вершины трещины в анизотропных упругих средах: влияние слагаемых высокого порядка малости.....	230
213.Мушанкова К.А., Степанова Л.В. Сравнение непрерывного и дискретного подходов к определению полей напряжений в окрестности вершины трещины.....	231
214.Наймарк О.Б. Нелинейная динамика трансформаций клеточных структур при онкологических патологиях и в условиях микрогравитации	232
215.Нарайкин О.С., Сорокин Ф.Д., Козубняк С.А. Расщепление собственных частот тонкостенной оболочки с малыми отклонениями формы срединной поверхности от осевой симметрии.....	233
216.Насырова Д.А., Башмаков Р.А. Колебания столба жидкости в открытой скважине и сообщаемой с пластом.....	234
217.Некрасов О.О., Смородин Б.Л. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в постоянном и переменном электрическом поле	235
218.Нестеров С.А., Бакланов В.Д. Численный расчёт взаимовлияющих физических полей магнитогазодинамического герметизатора.....	236
219.Никитин А.Д., Никитин И.С. Комплексное исследование роста усталостных трещин в гладких образцах при сверхмногоцикловом кручении	237
220.Никитин И.С., Никитин А.Д. Моделирование зарождения и роста усталостных трещин в авиационных конструкциях	238
221.Никитин Н.В. Вторичные течения, генерируемые турбулентностью	239
222.Никитюк А.С., Кошкина А.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Исследование механических свойств клетки эукариот в рамках статистико-термодинамического подхода.....	240
223.Никулин И.Л., Демин В.А., Никулина С.А. Численное моделирование разрыва поверхностной пленки движением расплава в переменном магнитном поле	241
224.Оборин В.А., Соколов М.А., Наймарк О.Б. Долговечность алюминиевых и титановых сплавов при комбинированном динамическом и последующем гигацикловом нагружении в условиях коррозионной среды.....	242
225.Озерных В.С., Голбрайт Е., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В. Развитие торсионной моды вихря в цилиндрической ячейке под действием электромагнитных сил	243
226.Озерных В.С., Колесниченко И.В. Течение в жидком металле вблизи двух сферических электропроводящих частиц.....	244
227.Окатыев Р.С., Фрик П.Г., Гольбрайт Е.И., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д. О погрешности измерения скорости методом корреляционной расходомерии	245
228.Окатыев Р.С., Фрик П.Г., Колесниченко И.В. Влияние неоднородности свойств жидкости на течение Гартмана	246
229.Окатыев Р.С., Фрик П.Г., Соколов Д.Д. Исследование структуры спектра солнечной активности в рамках модели Паркера.....	247
230.Оконечников А.С., Федотенков Г.В., Феоктистова Е.С. Нестационарный контакт жесткого штампа с мембраной на произвольном этапе взаимодействия	248
231.Ольховский Д.В., Бублик С.А. Расчет тепломассопереноса в тупиковой горной выработке переменной длины	249
232.Омельянчик А.С., Родионова В.В. Магнитные свойства сверхмалых наночастиц оксидов железа	250
233.Осипенко М.А. Задача об одностороннем контакте струны и балки	251
234.Останин П.А. Задача ассимиляции данных для уравнения амбиполярной диффузии в модели F слоя ионосферы Земли.....	252

235.Остапович К.В. О проектировании рационально текстурированных поликристаллических изделий с использованием многоуровневых моделей неупругого деформирования	253
236.Охотников А.О., Ровой Э., Антонова О.В., Охотников О.И. Математическое моделирование коронарных и эндобилиарных стентов.....	254
237.Очиров А.А. О влиянии поверхностного электрического заряда на волновое движение в вязкой жидкости.....	255
238.Очиров А.А., Лапшина К.Ю. О влиянии поверхностного электрического заряда на поверхностные волны в равномерно стратифицированных невязких жидкостях	256
239.Палымский И.Б. Об особенностях конвекции в сжимаемом газе.....	257
240.Панов Д.В., Ковалец Н.П., Волчков И.С. Изучение свойств и характеристика металл-полимерного композитного проводника на основе серебряных нанопроволок.....	258
241.Пантелеев И.А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии	259
242.Пантелеев И.А., Зайцев А.В., Устинов К.Б., Мубассарова В.А., Шевцов Н.И., Химуля В.В., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Ориентационная природа эффекта Кайзера при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника.....	260
243.Панфилов П.Е., Коровин Р.В., Меженев М.Е., Кочанов А.Н., Зайцев Д.В. Об особенностях разрушения горных пород различного генезиса.....	261
244.Папкова И.В., Крысько А.В. Хаотическая динамика функционально-градиентных геометрически и физически нелинейных нанобалок Эйлера-Бернулли	262
245.Папкова И.В., Яковлева Т.В. Собственные колебания функционально-градиентных прямоугольных нано пластин с присоединенной массой в температурном поле	263
246.Пегливанова М.М., Назарова Е.Д., Филин В.Ю. Сравнение оценок удлинения образцов на растяжение разной кратности	264
247.Пелевин А.Г., Поморцева Т.Н., Свистков А.Л. Многоуровневое моделирование механического поведения отверждаемых элементов изделий, используемых на околоземных орбитах	265
248.Пермякова Э.В., Голдобин Д.С. Стохастическое параметрическое возбуждение конвекции Рэля-Бенара	266
249.Пестренин В.М., Пестренина И.В., Кондюрин А.В., Ландик Л.В., Мерзляков А.Ф., Поморцева Т.Н. Расчетно-экспериментальное определение материальных параметров уравнения вязкоупругости не полностью отвержденного связующего	267
250.Петров А.Г. Высокоточные численные схемы метода граничных элементов и их применение для решения задач гидродинамики со свободной границей	268
251.Петров Д.А., Чупеев И.А. Магнитооптический отклик антиферромагнитных суспензий гетитовых частиц в жидком кристалле	269
252.Петухов Д.С., Адамов А.А., Келлер И.Э. Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозита по данным испытаний на свободное и стеснённое сжатие	270
253.Петухов Д.С., Келлер И.Э. Оценка усталостной прочности при наличии остаточных напряжений.....	271
254.Пешин С.Е., Кучумов А.Г., Каракулова Ю.В. Определение давления в запястном канале при движении кисти с помощью биомеханического моделирования	272
255.Пещеренко С.Н., Башкиров А.С. Оптимизация нефтяных центробежных насосов	273
256.Пещеренко С.Н., Башкиров А.С., Козлов И.В. Коэффициент полезного действия масштабированных нефтяных насосов	274
257.Пиль Н.Е., Кучумов А.Г. Влияние выбора модели материала для описания гемодинамики аортального клапана в норме и при патологии.....	275
258.Пинягин Д.С. Численное исследование эффективности призабойного нагревателя в нефтянной скважине	276
259.Пирогова Ю.В., Ташкинов М.А. Исследование влияния морфологии на упругие свойства пористых неоднородных структур	277

260.Плотников С.А., Шарифулин А.Н., Вертгейм И.И. Прямое численное 3D моделирование двумерного обобщения течения Колмогорова.....	278
261.Подолян Н.В., Мизева И.А., Белавенцева А.В., Камшилин А.А., Мамонтов О.В. Оценка функции эндотелия в проксимальных отделах сосудистой системы на основе видеофотоплетизмографии	279
262.Полуянов А.О., Колесниченко И.В. Воздействие переменного магнитного поля на перемешивание затопленной струи жидкого металла	280
263.Полуянов А.О., Колесниченко И.В. Генерация течения электропроводной среды в цилиндрической ячейке с помощью короткого соленоида.....	281
264.Поморцева Т.Н., Осоргина И.В., Шадрин В.В., Мерзляков А.Ф. Экспериментальное исследование препрегов, созданных на основе смолы ЭДТ-69Н, для применения их как конструкционного материала в изделиях на околоземной орбите	282
265.Попов Е.С., Гончаров М.М., Буркова Е.Н., Юрина А.Д. Влияние фактора формы на сегрегацию магнитной жидкости в N - угольной полости	283
266.Попова Е.Н., Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Влияние аспектного отношения на формирование бароклинных волн во вращающемся цилиндрическом слое	284
267.Прууэл Э.Р. Использование синхротронного излучения для исследования быстропротекающих процессов и задач материаловедения.....	285
268.Пшеничников С.Г. Нестационарные волны в вязкоупругих телах из функционально-градиентного материала	286
269.Радужнов Д.И., Соловьева А.Ю., Елфимова Е.А. Влияние полидисперсности на магнитные свойства ансамбля неподвижных суперпарамагнитных частиц	287
270.Роговой А.А., Столбова О.С. Микроструктурная модель магнитного и деформационного поведения моно- и поликристаллических сплавов Гейслера	288
271.Роготнев А.А., Игнатова А.М., Наймарк О.Б. Моделирование гистологической картины в процессе постимплантационного остеогенеза на границе имплантационно-костного блока	289
272.Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В. Модификация двухуровневой конститутивной модели поликристаллической меди для описания измельчения зеренной структуры и результаты ее применения для исследования равноканального углового прессования.....	290
273.Рублев И.А., Фрейдин А.Б. Распространение фронта химической реакции в постановках нестационарной и стационарной диффузии.....	291
274.Русаков В.В., Райхер Ю.Л. Нелинейная восприимчивость ансамбля плоских ротаторов в вязкоупругой жидкости.....	292
275.Русанов М.С., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Магнитный отклик концентрированной феррожидкости на переменное поле произвольной амплитуды	293
276.Рыбкин К.А., Любимова Т.П., Кучинский М.О. Интенсифицирующее воздействие ультразвука на флотацию кварца	294
277.Рыжков А.В. Моделирование отклика магнитной полимеросомы на приложенное неоднородное магнитное поле.....	295
278.Рысин К.Ю. Влияние либраций на теплоперенос во вращающемся вокруг горизонтальной оси плоском слое.....	296
279.Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А. Динамика многофазных магнитножидкостных систем в неоднородном магнитном поле	297
280.Садиллов Е.С. Совместное влияние нормального электрического поля и нормальных вибраций на устойчивость границы раздела между жидкостью и газом	298
281.Садовникова А.Д., Фаттахова И.А., Рыбкин К.А., Любимова Т.П. Экспериментальное исследование влияния ультразвука на воздушные пузырьки в растворах ПАВ	299
282.Сайдаков В.Д., Козлов В.Г. Поведение двух жидкостей в неравномерно вращающемся щелевом зазоре	300
283.Салихова Н.К., Осколков А.А., Келлер И.Э., Трушников Д.Н. Определение параметров режима многослойной проволочно-дуговой наплавки	301

284.Самсонов Д.С., Груздь С.А. Расчет течения расплава Al-Si на поверхности сложной геометрии.....	302
285.Сахабутдинова Л.Р., Аввакумов Д.А., Топорков А.И. Биомеханика зубов с клиновидными дефектами до и после реставрации	303
286.Свистков А.Л. Термодинамика эластомерных нанокомпозитов	304
287.Семин М.А., Головатый И.И., Левин Л.Ю. Совершенствование подходов к определению несущей способности ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов	305
288.Серенкова А.Ю., Соколов Д.Д., Юшков Е.В. Влияние магнитной диффузии на параметрический резонанс в паркеровской модели солнечного динамо.....	306
289.Сероваев Г.С., Кошелева Н.А. Применение волоконно-оптических датчиков в качестве инструмента мониторинга изделий полученных с помощью 3D печати	307
290.Сероштанов В.В., Маслов В.А., Митяков В.Ю., Сапожников С.З. Градиентная теплотометрия в исследовании интенсификации конвективного теплообмена.....	308
291.Скульский О.И. Течение суспензии в канале с пористыми стенками.....	309
292.Сметанников О.Ю., Сахабутдинова Л.Р. Аппроксимация в ANSYS Mechanical термовязкоупруго поведения анизотропного композита с помощью модели Prony	310
293.Смолянов И.А., Шмаков Е.И. Влияние размера сетки и модели турбулентности на результаты расчетов задачи потока жидкости в прямоугольном канале под воздействием магнитного поля.....	311
294.Сморозин Б.Л., Тараут А.В. Локализованные бегущие волны в коллоидной суспензии, заполняющей замкнутую ячейку.....	312
295.Соколов М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение локализации пластической деформации как результата эволюции дефектной структуры материалов	313
296.Соколов А.К., Гаришин О.К., Свистков А.Л. Расшифровка результатов индентирования зонда АСМ в наполненный эластомер с помощью искусственной нейросети.....	314
297.Соколов А.С., Пантелеев И.А., Барях А.А. Анализ дефектной структуры образцов соляной породы.....	315
298.Соколов Д.Д. Как экзопланеты могут помочь понять работу динамо	316
299.Соломонов Д.Г., Нихамкин М.Ш., Саженов Н.А., Конев И.П. Закономерности усталостного разрушения типовых элементов авиационных конструкций из ПКМ.....	317
300.Староверов О.А., Мельникова В.А., Мугатаров А.И., Чеботарёва Е.А. Изучение закономерностей механического поведения углепластиков в условиях предварительных ударных и последующих квазистатических и циклических воздействий	318
301.Степанов Р.А. Пространственная неоднородность атмосферной турбулентности по данным реанализа NCEP-CFSR.....	319
302.Степанов Р.А., Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Кузанын К.М., Клиорин Н.И. Спектральные и корреляционные свойства турбулентной конвекции в прямоугольном объеме	320
303.Степанов Р.А., Соколов Д.Д., Фрик П.Г. Согласованность климатических изменений различных временных масштабов в Центральной Англии и Гренландии.....	321
304.Степанова Л.В., Анисимов Г.С. Расчет параметров механики хрупкого разрушения с помощью метода голографической интерферометрии	322
305.Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г. Численное исследование автоколебаний плоской воздушной струи, распространяющейся в ограниченном пространстве.....	323
306.Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Моделирование гистерезиса деформации в магнитоактивных эластомерах.....	324
307.Субботин С.В., Ширяева М.А., Шмакова Н.Д., Ерманюк Е.В., Козлов В.Г. О механизмах генерации азимутально-периодических структур во вращающейся сферической полости с колеблющимся ядром	325
308.Субботин С.В., Шмакова Н.Д., Козлов В.Г., Ерманюк Е.В. Нелинейная динамика аттракторов инерционных волн в цилиндрическом слое вращающейся жидкости.....	326

309.Султанов Л.У., Кадиров А.М. Расчет деформирования трехмерных тел с учетом повреждаемости материала.....	327
310.Сухановский А.Н., Попова Е.Н., Васильев А.Ю. Лабораторное моделирование арктического потепления	328
311.Танканаг А.В., Тихонова И.В., Гусева И.Е., Гриневич А.А. Особенности регуляции кожной микрогемодинамики верхних и нижних конечностей в ответ на ортостаз у больных сахарным диабетом 2го типа	329
312.Тарасова А.С., Ташкинов М.А., Зильбершмидт В.В. Влияние наполнителя на отрицательный коэффициент Пуассона ауксетичных композитов	330
313.Тебякин А.Д., Крысько В.А. Математическая модель физически нелинейных функционально-градиентных пористых нанопластинок, находящихся в температурном поле с учётом влажности	331
314.Тимкина Т.Д., Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Иванов Я.Н. Влияние геометрии катетера и скорости инфузии на гемодинамику катетеризированного сосуда	332
315.Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Бервицкий А.В., Станкевич Ю.А., Паршин Д.В. Динамическое наблюдение милиарных и асимптомных церебральных аневризм для разработки критерия их разрыва	333
316.Толстых М.А. Математические модели общей циркуляции атмосферы	334
317.Тюлькина И.В., Голдобин Д.С. Фазовая редукция для колебательной термоконцентрационной конвекции в пористой среде	335
318.Уваров С.В., Ефремов Д.В. Исследование гидролюминесценции в гидравлическом масле при протекании в узком канале	336
319.Угрюмов Р.И. Об уравнениях плоской задачи моментной теории упругости со стесненным вращением.....	337
320.Устинов К.Б. О граничных условиях для пластин, моделирующих покрытия при их отслоении.....	338
321.Устинов К.Б., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Прочностная анизотропия пород, интерпретация данных скважинных измерений.....	339
322.Уточкин В.Ю., Брацун Д.А. Режимы неустойчивости в системе несмешивающихся реагирующих растворов	340
323.Фатгалов О.О., Любимова Т.П. Агломерация частиц кварца в жидкости под действием ультразвука различной мощности	341
324.Федоренко А.Н., Федулов Б.Н., Староверов О.А., Евлашин С.А., Ломакин Е.В. Механические характеристики и критерий пластичности для нержавеющей стали, полученной по технологии лазерного сплавления.....	342
325.Фёдоров А.Ю., Галкина Е.Б. Экспериментальное исследование эффективности снижения напряжений вблизи V-образных надразов несжимаемыми материалами.....	343
326.Федотенков Г.В. Обобщенная модель термоупругого стержня.....	344
327.Федулов Б.Н., Минаев Н.Г., Федоренко А.Н., Ломакин Е.В. Волочение полосы с пластическими свойствами чувствительными к виду напряженного состояния	345
328.Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Литвинцев К.Ю., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Движение погруженной пластины в развитом свободно конвективном слое	346
329.Филиппова Ю.А., Папугаева А.В., Бедин С.А., Разумовская И.В. Магнитные жидкости на основе силиконового масла.....	347
330.Фрейдин А.Б. Связанные задачи хемомеханики: локализованные и объемные реакции.....	348
331.Фрик П.Г., Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Сухановский А.Н. Двухмерные блуждания погруженного диска в подогреваемом снизу конвективном слое	349
332.Хабин М.Р., Марышев Б.С. Реализация метода Флоке для решения задачи устойчивости сквозного течения прямоугольной области пористой среды	350
333.Хвостунков К.А., Федотов К.А. Разрушение двухслойной балки в условиях ползучести при трехточечном нагружении	351

334.Хохрякова К.А., Шмыров А.В., Мизева И.А. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости во внешнем магнитном поле.....	352
335.Хроматов В.Е., Келлер И.Э. Специальность "Динамика и прочность машин" в СССР..	353
336.Цаюков А.А. Упруго-вязкопластическая модель деформирования соляных образцов: релаксация и ползучесть	354
337.Цветков Р.В., Гусев Г.Н., Епин В.В., Корепанов В.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Локация области ударного воздействия в железобетонной конструкции по корреляции различных вибрационных параметров.....	355
338.Чаплий Д.В., Степанова Л.В. Анализ механических полей в окрестности вершины трещины в условиях ползучести с учетом накопления поврежденности	356
339.Чашечкин Ю.Д. Динамика, энергетика и акустика импакта свободно падающей капли	357
340.Чашечкин Ю.Д. Инженерная математика/техническая физика течений жидкостей и газов	358
341.Чеботарева Е.А., Лунегова Е.М., Лобанов Д.С. Изучение механизмов разрушения в углепластиках при трехточечном изгибе с применением метода акустической эмиссии	359
342.Чеботарева Е.А., Струнгарь Е.М. Применение метода акустической эмиссии для оценки влияния структуры материала на механизмы деформирования углепластиков	360
343.Чернышова Д.В., Иванкова Е.П., Намоконов А.Н., Евстигнеева А.А. Напряженное состояние литейной керамической оболочковой формы при затвердевании в ней стальной цилиндрической отливки	361
344.Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю. Медленная релаксация намагниченности феррожидкости с внутренними структурами	362
345.Чудинов В.В., Сокоиков М.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Применение стержня Гопкинсона-Кольского для изучения локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения	363
346.Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Литвинов В.В., Иванов Я.Н., Солodников С.Ю. Влияние дозы ионов плазменной обработки на биосовместимость формируемого карбонизованного нанослоя.....	364
347.Чупин А.В., Машкина А.К. О роли сжимаемости в устойчивости ламинарного течения в торе	365
348.Шавшуков В.Е. Распределение деформаций в поликристаллических материалах	366
349.Шакиров Н.В., Судаков А.И. Моделирование реологических свойств крови или существует ли предел текучести?.....	367
350.Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Численное моделирование роста множественных трещин в структуре трабекулярной кости с использованием метода XFEM	368
351.Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В. Разработка актуатора для железобетонных конструкций на основе пьезокерамики	369
352.Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В. Учет влияния легирующих добавок в многоуровневой конститутивной модели для описания сверхпластичности алюминиевых сплавов	370
353.Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. О комплексной численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов.....	371
354.Шельдешова Е.В., Ряполов П.А. «Магнитовязкий» эффект в магнитной жидкости и бидисперсных магнитных системах в однородном магнитном поле	372
355.Шестаков А.В., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Режим Обухова-Болджиано в вынужденной турбулентности	373
356.Шешенин С.В., Артамонова Н.Б. Высшие приближения метода осреднения	374
357.Ширяева М.А., Субботин С.В. Экспериментальное исследование осреднённой циркуляции, возбуждаемой аттрактором инерционных волн во вращающемся цилиндре ...	375
358.Шитикова М.В. Модели вязкоупругих сред на основе операторов дробного порядка и их применение в динамических задачах механики деформируемого твердого тела	376

359.Шмаков Е.И., Смольянов И.А. Расчет динамики жидкости в индукционном насосе посредством свободного программного обеспечения	377
360.Шмакова Н.Д., Стенникова О.Е., Карра Ж.-Б., Ерманюк Е.В. Влияние жидкой фракции пены на обтекание локального проницаемого препятствия в ячейке Хеле-Шоу	378
361.Шмыров А.В., Денисова М.О., Мизёв А.И. Особенности протекания реакции нейтрализации в системе с межфазной границей в условиях центробежных перегрузок	379
362.Шмыров А.В., Мошева Е.А., Мизёв А.И. Диэлектрофоретическое разделение водомасляных эмульсий как эффективный инструмент дегидратации нефтепродуктов.....	380
363.Шмырова А.И., Нурмухаметов Д.И., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С., Паньков А.С. Изготовлении линзованных волокон методом химического травления под влиянием гидродинамического течения, генерируемого инфракрасным излучением	381
364.Шобей М.М., Судаков И.А., Зайцев А.В., Панин С.В. Влияние геометрии поверхностей скольжения на износостойкость пары трения металл – политетрафторэтилен.....	382
365.Шутов А.В. Нелокальные модели накопления повреждений в режиме пластической деформации.....	383
366.Шутов А.В. Эффективное моделирование волокнистых композитов с учётом геометрической и физической нелинейностей	384
367.Яковлева Т.В. Гипер-хаотические колебания замкнутых цилиндрических оболочек при действии локальной знакопеременной нагрузки	385
368.Яковлева Т.В., Крысько А.В. Диагностика больных алкоголизмом с помощью методов нелинейной динамики	386

О МЕХАНИЗМЕ ДОСТАВКИ КРЕМНИЯ В ХОДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИЛИЦИРОВАНИЯ

Агеева М.В.^{1,2}, Демин В.А.¹, Демина Т.В.², Зинурова В.Э.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
demin@psu.ru

Проанализирован процесс переноса газообразного кремния через атмосферу инертного газа от зеркала расплава к поверхности изделия в ходе высокотемпературного силицирования углеродного пористого материала. Построена физико-математическая модель, объясняющая аномально большие потоки паров кремния на входе в изделие. Показано, что в максимально упрощенной одномерной постановке в случае однородного поля температуры задача может быть решена аналитически. Полученное распределение кремния показывает, что даже при сильном поглощении на поверхности изделия его пары заполняют практически весь объем в рабочем пространстве печи. Это означает, что не имеет смысла стремиться максимально приближать тигли с расплавом к поверхности изделия как это ранее предполагалось технологами, исходя из результатов работы [1]. Численное решение предлагаемого нелинейного уравнения диффузии [2] показывает, что стационарный логарифмический профиль концентрации устанавливается за время, измеряемое секундами. Разработанная физико-математическая модель переноса паров кремния может быть обобщена на случай неоднородного распределения температуры в пространстве реторты и дает дополнительное усиление конвективно-диффузионного переноса, если расплав имеет более высокую температуру, нежели изделие. Таким образом, единственной причиной, по которой крупногабаритное изделие в эксперименте оказывается недостаточно насыщенным кремнием, является неудачный тепловой режим всего процесса, ход которого определяется конструктивными особенностями печи. Иными словами, для прохождения первичной химической реакции карбидизации углеродного волокна и дальнейшей конденсации паров кремния в порах материала требуется технология с более строгим контролем температуры на поверхности изделия.

Литература

- [1] Кулик В.И., Кулик А.В., Рамм М.С., Демин С.Е. Численное исследование градиентных газофазных процессов получения керамоматричных композитов с SiC матрицей // V Межд. конф. “Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества”. Сб. матер. конф., М.: ИМЕТ РАН, Суздаль, 2014, с. 128-129..
- [2] Демин В.А., Демина Т.В., Марышев Б.С. Физико-математическая модель переноса газообразного кремния в ходе высокотемпературного силицирования углеродных композитных материалов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 3, с. 48-55.

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ МНОЖЕСТВЕННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТАМИ

Аглетдинов Э.А.¹, Банников М.В.¹, Баяндин Ю.В.¹, Бурмистров Е.В.¹, Лукин С.В.²,
Никитюк А.С.¹, Уваров С.В.¹, Чудинов В.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург

aeinar7@gmail.com, mbannikov@icmm.ru, buv@icmm.ru, burmistrov.e@icmm.ru,
Lukin.SV@gazpromneft-ntc.ru, nas@icmm.ru, usv@icmm.ru, chudinov@icmm.ru,
naimark@icmm.ru

Работа посвящена исследованию стадийности процесса разрушения горных пород. Для достижения целей исследования были проведены эксперименты на образцах горных пород по их квазистатическому индентированию с записью сигналов акустической эмиссии.

В процессе нагружения наблюдались макро- и микроскопические флуктуации усилия индентирования. Макроскопические флуктуации были связаны с развитием макротрещин и образованием крупных фрагментов породы. Микроскопические флуктуации связаны с уплотнением породы, образованием микротрещин, схлопыванием микропор.

Акустический сигнал, инициированный процессами поврежденности в зоне индентирования, показал наличие двух асимптотических режимов, соответствующих плато «насыщения» структурной функции и определяющих симметрию («размерность аттракторов») системы, демонстрирующей детерминированный хаос [1]. Разделение двух плато «насыщения» выраженным локальным минимумом указывает на существование двух типов аттракторов.

Анализируя данные по флуктуации усилия нагружения и энергии акустического сигнала, удалось установить соответствия между типами коллективных мод ансамблей дефектов сдвига, эффектами кластеризации поврежденности и стадийностью процесса разрушения в очаге деформации. Автомодельная природа коллективных мод является основой для интерпретации данных индентирования, обобщения результатов на масштабы сейсмических и техногенных событий, и определения параметров, характеризующих развитие очага разрушения в процессах бурения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596013.

Литература

[1] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988.

СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА И НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО СЛОЯ

Айзикович С.М., Лапина П.А., Зеленцов В.Б., Волков С.С.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
saizikovich@gmail.com, polina_azarova86@mail.ru, vbzelen@gmail.com, fenix_rsu@mail.ru

В работе предлагается новый подход к анализу эквивалентности различных моделей неоднородного упругого полупространства и неоднородного упругого слоя. Метод основан на исследовании трансформант ядер интегральных уравнений для неоднородного упругого полупространства и неоднородного упругого слоя. Метод может быть использован для качественного анализа свойств решений различных моделей неоднородного упругого полупространства и неоднородного упругого слоя.

Анализ эквивалентности различных моделей иллюстрируется на примере решения контактных задач о сдвиге поверхности упругого неоднородного по глубине полупространства и сдвиге поверхности упругого неоднородного по глубине слоя. Реализовано сравнение решений ряда контактных задач. Решения построены приближённо аналитически при помощи различных асимптотических методов, с целью определения значений параметров моделей задач, при которых решения близки друг к другу.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (договор №22-19-00732).

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В РИВУЛТЕ, СТЕКАЮЩЕМ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ

Актершев С.П., Алексеенко С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск
sergey-aktershev@mail.ru

Течение тонких пленок жидкости реализуется в различных технологических процессах и аппаратах, предназначенных для интенсификации процессов теплообмена, таких как абсорберы, ректификационные колонны, кристаллизаторы, электролизеры. Близким к пленкам и практически значимым классом течений тонких слоев жидкости со свободной поверхностью является ривулетное (ручейковое) течение, которое реализуется во многих установках в нефтегазовой промышленности, в пищевой промышленности, в теплообменных аппаратах, в холодильной технике, в аппаратах химической технологии. На основе разработанной полуаналитической модели [1] исследуются нелинейные волны в прямолинейном ривулете, стекающем по вертикальной пластине. В отличие от трудоемких численных расчетов [2], выполненных только для некоторых экспериментальных условий [3], полуаналитическая модель позволяет реализовать серии массовых расчетов с целью проанализировать влияние физических свойств жидкости и параметров ручейкового течения на характеристики нелинейных волн. В данной работе подробно исследован простейший случай квазидвумерных волн. Проведен анализ устойчивости ривулетного течения и получены дисперсионные зависимости для линейных волн. Нелинейные волновые режимы вертикального ривулетного течения впервые исследованы численно в рамках двух различно поставленных проблем, а именно, проблемы стационарно бегущих волн с заданной длиной волны и проблемы пространственного развития возбужденных волн с заданной частотой. В расчетах получены характеристики нелинейных квазидвумерных стационарно бегущих волн при различных значениях волнового числа k . При малых значениях волнового числа численно найдено другое волновое семейство (семейство двугорбых волн), которое ответвляется от первого семейства посредством удвоения пространственного периода. Выявлено, что в некоторых узких диапазонах волнового числа стационарно бегущие волны не существуют, а реализуется пульсирующий волновой режим. Методом численного моделирования изучено пространственное развитие возбужденных волн. Показано, что при низких частотах на участке линейного роста развиваются двугорбые волны. Ниже по потоку они эволюционируют в одnogорбые солитоноподобные волны первого семейства. Указанные эффекты нелинейных волн были выявлены ранее в [1] для ривулета на поверхности слабо наклонного цилиндра, но для вертикального ривулета количественное различие оказалось довольно существенное (по значениям волнового числа и скорости волн).

Литература

- [1] Aktershev S.P., Alekseenko S.V., Bobylev A.V. Waves in a rivulet falling down an inclined cylinder // AICHE Journal. – 2021. – V. 67, Is.1. – P. e17002 (20).
- [2] Alekseenko S.V., Aktershev S.P., Bobylev A.V., Kharlamov S. M., Markovich D.M. Nonlinear forced waves in a vertical rivulet flow // J. Fluid Mech. – 2015. V. 770. – P.350-373.
- [3] Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Guzanov, V.V., Markovich, D.M., Kharlamov, S.M. Regular waves on vertically flowing rivulets at different wetting angles // Thermophys. Aeromech. – 2010. – V. 17 (3). – P. 371–384.

ДИНАМИКА ЗАЖАТОГО ПУЗЫРЬКА С УЧЕТОМ ГИСТЕРЕЗИСА КРАЕВОГО УГЛА

Алабужев А.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
alabuzhev@mail.ru*

Рассматриваются колебания газового пузырька в осциллирующем поле давления. Пузырек окружен несжимаемой жидкостью конечного объема со свободной поверхностью и зажат между двух параллельных твердых пластин. В равновесном состоянии пузырек имеет форму круглого цилиндра, ось симметрии которого перпендикулярна твердым пластинам. Изменение состояния газа внутри пузырька описывается политропным процессом. Собственные колебания такого пузырька исследовались в работе [1]. Для описания движения контактной линии используется эффективное граничное условие Хокинга [2]: скорость движения контактной линии прямо пропорциональна углу отклонения и движение контактной линии возможно, если значение краевого угла превышает некоторое критическое значение или

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \begin{cases} \lambda(\vartheta - \vartheta_0), & \vartheta > \vartheta_0, \\ 0, & |\vartheta| < \vartheta_0, \\ \lambda(\vartheta + \vartheta_0), & \vartheta < -\vartheta_0. \end{cases}$$

Здесь ζ – отклонение линии контакта трех сред от положения равновесия, ϑ – краевой угол, ϑ_0 – минимальное значение краевого угла, после которого возможно движение контактной линии, λ – параметр смачивания. Данное условие использовалось при исследовании вынужденных колебаний полусферической капли [3] и пузырька [4].

Литература

- [1] Алабужев А.А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, №2. – С. 151–161.
- [2] Hocking L. M. Waves produced by a vertically oscillating plate // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 179. – P. 267–281.
- [3] Fayzrakhmanova I.S., Straube A.V. Stick-slip dynamics of an oscillated sessile drop // Phys. Fluids. – 2009. – Vol. 21. – 072104.
- [4] Fayzrakhmanova I.S., Straube A.V., Shklyaev S. Bubble dynamics atop an oscillating substrate: Interplay of compressibility and contact angle hysteresis // Phys. Fluids. – 2011. – Vol. 23. – 102105.

ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА РЕЛАКСАЦИИ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ОБЕЗДВИЖЕННЫХ ДИПОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Амбаров А.В., Елфимова Е.А., Зверев В.С.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург*

alexander.ambarov@urfu.ru, ekaterina.elfimova@urfu.ru, vladimir.zverev@urfu.ru

Внедрение наночастиц в жидкую или полимерную матрицу позволяет управлять свойствами композитного материала с помощью внешнего магнитного поля. Такие материалы, так называемые магнитные мягкие вещества, включают феррожидкости, магнитные эластомеры, феррогели и различные биосовместимые магнитные наполнители. Эти сложные системы вызывают значительный интерес у исследователей, медиков и инженеров, поскольку они активно используются в прогрессивных промышленных и биомедицинских технологиях.

В работе исследуется динамический отклик системы взаимодействующих феррочастиц, находящихся в линейно-поляризованном переменном магнитном поле. Предполагается, что оси легкого намагничивания феррочастиц расположены параллельно друг другу. Рассмотрены два случая взаимной ориентации осей легкого намагничивания и магнитного поля: параллельное и перпендикулярное расположение. Релаксация магнитных моментов феррочастиц происходит по неелевскому механизму.

Вращательное движение магнитного момента случайной феррочастицы определяется из решения уравнения Фоккера-Планка-Брауна, в которое вводится дополнительное слагаемое, позволяющее учесть межчастичные диполь-дипольные взаимодействия на уровне модифицированной теории среднего поля первого порядка [1]. Полученные решения для плотности вероятности ориентации магнитного момента случайной частицы используются для определения динамических и релаксационных свойств.

Исследовано влияние на характерные времена релаксации магнитного момента амплитуды переменного магнитного поля, интенсивности постоянного магнитного поля, величины магнитной анизотропии, учета диполь-дипольных взаимодействий и взаимной ориентации магнитных полей.

Полученные результаты представляют собой важную информацию при проектировании и синтезе новых функциональных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Уральский математический центр» (номер соглашения 075-02-2022-877).

Литература

[1] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S. Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles // *Soft Matter*. – 2016. – V.12(15). – P. 3507-3513.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НЕФТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

Андреева А.И.¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
waandreeva@gmail.com

Для повышения нефтеотдачи пластов применяют различные методы, к примеру, закачивают воду и/или газ. Вода, действуя как поршень, способствует движению нефти к добывающим скважинам. Газ может растворяться в нефти, снижая ее вязкость и увеличивая ее объем. Одним из хорошо растворяющихся в нефти газов является углекислый газ (CO₂) [1,2]. Помимо этого, CO₂ является парниковым газом, поэтому для решения проблемы глобального потепления актуально уменьшение его выбросов в атмосферу. Одной из мер по декарбонизации является технология улавливания и захоронения CO₂ в нефтяных пластах. Чтобы повысить нефтеотдачу нужно определить оптимальные режимы закачки воды и/или газа: в каком порядке закачивать воду и газ, какие объемы необходимо закачать.

В данной работе рассматривается одномерное фильтрационное течение в области, расположенной вдоль оси Ox , на краях которой размещены добывающая и нагнетательная скважины. В начальный момент времени пористая среда насыщена нефтью заданного компонентного состава: 35% метана, 5% этана, 10% пропана и оставшиеся 50% – тяжелые углеводородные компоненты C₁₀, C₂₀, C₄₀. Концентрации компонент C₁₀, C₂₀, C₄₀ являются переменными величинами, которые в данной работе характеризуют различные нефти (легкие или тяжелые). В зависимости от состава нефти оптимальные режимы водогазового воздействия могут быть различными. Поэтому цель исследования – определить зависимость между физическими характеристиками пластовой нефти и оптимальным режимом водогазового воздействия. Одной из таких характеристик является плотность, по ней судят о товарном качестве нефти. Различным составам нефти соответствуют свои значения плотности, поэтому проводилось исследование влияния плотности нефти на оптимальные режимы водогазового воздействия. Также проводилось исследование влияния на эффективность водогазового воздействия таких характеристик пластовой нефти как давления насыщения и минимальное давление смесимости с углекислым газом, которые зависят от компонентного состава нефти и пластовой температуры. Показано, что данные характеристики нельзя использовать для оценки оптимальности стратегий воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-71-10051П.

Литература

- [1] Afanasyev A., Andreeva A., Chernova A. Numerical optimisation of co2 flooding using a hierarchy of reservoir models // *Advances in Geosciences*. — 2021. — Vol. 56. — P. 19–31.
- [2] Afanasyev A., Andreeva A., Chernova A. Influence of oil field production life on optimal co2 flooding strategies: Insight from the microscopic displacement efficiency // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 205. — P. 108803.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА В СКВАЖИНАХ РАЗНОГО ДИАМЕТРА С УЧЁТОМ ИНТЕНСИВНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ

Андрейко С.С., Мальцев В.М., Аникин В.В.

Горный институт УрО РАН, Пермь
ssa@mi-perm.ru, ymmal@bk.ru, anikin@mi-perm.ru

Основным методом ведения взрывных работ на карьерах является метод скважинных зарядов. При расчёте параметров взрывания, с учетом технологически заданных размеров скважин (длина и диаметр), определяются объём разрушенного массива горных пород, величина заряда и тип взрывчатого вещества (ВВ), расстояния между скважинами, величина линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и прогнозируется интенсивность дробления взорванной горной массы, необходимая для её дальнейшей переработки в производственном технологическом цикле. Определение последнего параметра может производиться по нескольким методикам и часто находится эмпирически на основе практических результатов ведения взрывных работ в конкретных условиях. В данной работе предлагается алгоритм определения интенсивности дробления (степени дробления) взорванной горной массы в зависимости от расчётных параметров взрывания, основанный на предположении, что основным фактором разрушения является импульс давления взрывных газов (импульс взрыва), равный произведению давления на длительность его воздействия на объект разрушения [1]. Определение величины ЛНС производится на основе расчёта величины импульса на определённом расстоянии от центра взрыва в зависимости от размеров скважины. При использовании импульса взрыва в критерий прочности пород должна входить характеристика интенсивности разрушения (дробления) от конкретного динамического воздействия. Такой критерий разработан и опробован на практике при ведении взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей [3-5]. По данной методике рассчитаны расстояния между скважинами, ЛНС и степень дробления взорванной горной массы для 17 типов горных пород со статической прочностью на сжатие от 30 до 335 МПа при взрывании скважин диаметром 84-320 мм и длиной заряда 16 м при полном зарядании ВВ типа аммонит 6ЖВ. Сходимость расчётных значений с натурными измерениями находится в пределах 10-15%.

Литература

- [1] Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
- [2] Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
- [3] Лыхин П.А., Мальцев В.М. Нормированный импульс дробления как показатель дробимости горных пород // Физические проблемы разрушения массивов горных пород: сб. докл. Междунар. конф. – М.: РАН, 1999. – С.174-176.
- [4] Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь: 1984.– 195 с.
- [5] Щерба В.Я., Башура А.Н., Андрейко С.С. Управление газодинамическими процессами на Старобинском месторождении калийных солей / под ред. В.Я. Прушака. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 194 с.: ил.
- [6] Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учётом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 42-46. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.9.
- [7] Andreiko S.S., Maltsev V.M., Anikin V.V., Nesterov E.A. Calculation of crack formation radius by modeling the explosive charge with a radial clearance // Procedia Structural Integrity. – V. 32, № C. – P. 3-9. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.002.

О КОЛЕБАНИЯХ КОЛЬЦА, ПОДКРЕПЛЕННОГО НИТЯМИ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ

Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н.

Физико-математический институт ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар
veran@list.ru, vntarasov@dm.komisc.ru

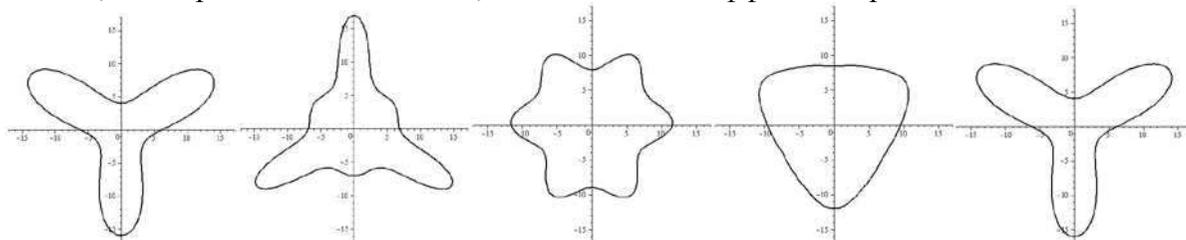
Рассмотрим задачу о свободных колебаниях колец, подкреплённых нитями. Обозначим через $u(\varphi, t)$ и $v(\varphi, t)$ нормальное и касательное перемещения точек кольца, R – радиус, D – жесткость кольца при изгибе, ρ – погонная плотность кольца, c – жесткость нитей на растяжение. Предполагается, что выполнено условие несжимаемости $u = v' = \frac{dv}{d\varphi}$. Пусть

один конец нити прикреплен к точке кольца, а другой – к неподвижному его центру, и нити расположены достаточно часто. Считаем, что нити не работают на сжатие, то есть упругая энергия нити в результате деформации определяется формулой $\frac{c}{2}u_+$, где $u_+ = \max(0; u) = \frac{1}{2}(u + |u|)$. В этом случае функционал действия имеет вид:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \frac{R\rho}{2} \int_0^{2\pi} (\dot{u}^2 + \dot{v}^2) d\varphi - \frac{D}{2R^3} \int_0^{2\pi} (u'' + u)^2 d\varphi - \frac{c}{2} \int_0^{2\pi} u_+^2 d\varphi dt.$$

Представляя перемещения в виде частичной суммы ряда Фурье $v = \sum_{k=1}^n (A_k(t) \sin k\varphi + B_k(t) \cos k\varphi)$, получаем уравнения Эйлера – Остроградского, которые интегрируются методом Рунге – Кутты.

На рисунке изображены формы свободных колебаний при различных значениях t : $t = 0$, $t = 6.9$, $t = 8.1$, $t = 14.7$, $t = 32.1$ с начальным приближением $A_3(0) = 2 \cos 3\varphi$, все остальные коэффициенты ряда Фурье равны нулю: $A_k(0) = 0$, $B_k(0) = 0$. Для нелинейных колебаний кольца, подкреплённого нитями, наблюдается эффект Ферми – Паста – Улама [1].



Этот эффект для нелинейных колебаний пластин исследовался авторами в [2].

Литература

- [1] Улам С. Нерешенные математические задачи – М: Изд. Наука, 1964. – 168 с.
[2] Тарасов В.Н., Андрюкова В.Ю. О нелинейных колебаниях прямоугольных пластин – Вестник Сыктывкарского университета, 2010, выпуск 11. – с. 76-85.

МОДЕЛЬ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ АПКОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ

Анисимов Р.А.¹, Ломова М.В.², Кочубей В.И.^{1,2}, Янина И.Ю.^{1,2}

¹*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

²*Томский национальный исследовательский государственный университет, Томск
irina-yanina@yandex.ru*

Одним из перспективных материалов для развития методов фотодинамической терапии являются функционализированные апконверсионные наночастицы, которые позволяют не только повысить эффективность терапии, но и расширить диагностический инструментарий. Сшивка фотодинамического красителя с оболочкой наночастиц требует дополнительного покрытия их поверхности. Нанооболочки сывороточного альбумина биосовместимы со многими типами клеток в широком диапазоне концентраций [1], легко усваиваются клетками [1, 2], неиммуногенны и имеют длительный период полураспада в кровотоке [3, 4].

С целью повышения интенсивности люминесценции частицы покрывают оболочкой. Это предотвращает безызлучательную передачу энергии в окружающую среду. Кроме того, оболочка предоставляет возможность мультифункционализации наночастиц.

Были получены системы ядро-оболочка субмикронного размера содержащие апконверсионные наночастицы и фотосенсибилизатор. В качестве ядра были использованы субмикронные частицы CaCO₃ [5]. Оболочку из бычьего сывороточного альбумина создавали по методу послойной адсорбции [6]. Согласно полученным данным средний размер пор варьируется в пределах 30-80 нм, что сопоставимо с размером капсулированных частиц. Наличие красителя на поверхности наночастиц определялось по спектрам поглощения.

Таким образом, нами разработан новый метод получения стабильной оболочки апконверсионных наночастиц из бычьего сывороточного альбумина. Произведено покрытие поверхности наночастиц фотодинамическим красителем за счет связывания его с альбумином. Показано наличие излучательного переноса энергии от наночастиц к красителю при возбуждении люминесценции наночастиц длинноволновым излучением (980 нм).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-10057, <https://rscf.ru/project/21-72-10057/>.

Литература

- [1] Michaelis K., Hoffmann M. M., Dreis S., Herbert E., Alyautdin R. N., Michaelis M., Kreuter J., Langer K. Covalent linkage of apolipoprotein e to albumin nanoparticles strongly enhances drug transport into the brain // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* – 2006. – Vol. 317. – P. 1246.
- [2] Irache J. M., Merodio M., Arnedo A., Camapanero M. A., Mirshahi M., Espuelas S. Albumin nanoparticles for the intravitreal delivery of anticytomegaloviral drugs // *Mini Rev. Med. Chem.* – 2005. – Vol. 5. – P.293.
- [3] Loureiro A., Azoia N. G., Gomes A. C., Cavaco-Paulo A. Albumin-Based Nanodevices as Drug Carriers // *Curr. Pharm. Des.* – 2016. – V. 22. – P. 1371-1390.
- [4] An F.F., Zhang X. H. Strategies for Preparing Albumin-based Nanoparticles for Multifunctional Bioimaging and Drug Delivery // *Theranostics.* – 2017. – V. 7. – P. 3667-3689.
- [5] Kozlova A. A., German S. V., Atkin V. S., Zhev V. V., Astle M. A., Bratashov D. N., Svenskaya Y. I., Gorin D. A. Magnetic Composite Submicron Carriers with Structure-Dependent MRI Contrast // *Inorganics.* – 2020. – V. 8. – No.2. – P. 11.
- [6] Demina P.A., Abalymov A.A., Voronin D.V., Sadovnikov A.V., Lomova M.V. Highly-magnetic mineral protein-tannin vehicles with anti-breast cancer activity // *Mater. Chem. Front.* – 2021. – V. 5. – P. 2007.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ КОНСОЛИДАЦИИ

Артамонова Н.Б., Шешенин С.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва
artamonovanb@mail.ru, sergey.sheshenin@mail.ru

В работе предложена и математически исследована достаточно общая формулировка физически и геометрически нелинейной задачи деформирования пористого флюидонасыщенного грунта под нагрузкой при оттоке жидкости из пор. Задача сформулирована в скоростях перемещений твердой фазы и скоростях изменения давления жидкости в дифференциальном и вариационном виде. Уравнения связанной модели консолидации были выведены из общих законов сохранения механики сплошной среды с применением пространственного осреднения по представительной области. В модели учитывалось изменение пористости и проницаемости среды в процессе деформирования. Для пространственной дискретизации седловой системы уравнений применялся метод конечных элементов (МКЭ): квадратичные серендиповы элементы для аппроксимации собственно уравнений равновесия и элементы типа Brick для аппроксимации уравнения фильтрации. Такой выбор конечных элементов позволяет удовлетворить известное условие корректности Ладыженской-Бабушки-Брецци. Для моделирования определяющих соотношений используется обобщение модели С.С. Григоряна на большие деформации. Для решения системы уравнений равновесия и фильтрации использовалось обобщение неявной схемы с внутренними итерациями на каждом шаге по времени по методу Узавы. Затем значение пористости уточняется в ходе решения третьего уравнения системы с использованием неявной схемы Эйлера. Уточненные значения пористости учитываются при решении уравнений равновесия и фильтрации на следующем временном шаге. Сходимость итерационного процесса изучена теоретически. Постановка численно реализована в виде собственной компьютерной программы.

Изложены методика и результаты экспериментального определения параметров модели консолидации песчаного грунта на автоматизированном комплексе АСИС (ООО НПП «Геотек»). Для определения объемных модулей проводились испытания сухого и водонасыщенного песчаного грунта на компрессионное сжатие при непрерывно растущей вертикальной нагрузке с постоянной скоростью деформации. Прочностные характеристики на сдвиг (угол внутреннего трения и сцепление) песчаных грунтов определялись с помощью установки многоплоскостного среза. Испытания проводились в кинематическом режиме приложения сдвигающей нагрузки с заданной постоянной скоростью деформации по схеме консолидировано-дренированного сдвига. Исследованы зависимости деформационных и прочностных свойств грубозернистого и мелкозернистого кварцевого песка от скорости деформации.

Приведены результаты численного моделирования. Используемая модель консолидации может применяться для моделирования образования колеи грунтовых дорог, для расчета неравномерной осадки инженерных сооружений. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению № 075-15-2022-284. Экспериментальные исследования песчаного грунта проводились на автоматизированном испытательном комплексе АСИС, приобретенном за счёт средств Программы развития Московского университета (контракт № 1040-44-2019 от 24.09.2019).

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ОСАЖДЕНИЯ КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
tarm12376@gmail.com

Гравитационное осаждение кластера капель в воздушной среде встречается во многих технических системах и технологических процессах. В частности, при сбросе хладагента в очаг пожара с борта летательного аппарата [1], при аварийном сбросе авиационного и ракетного топлива при отделении отработанных ступеней ракет-носителей [2, 3]. На динамику осаждения кластера капель оказывают значительное влияние большое количество определяющих параметров. Одним из основных параметров, является коэффициент поверхностного натяжения жидкости, для изменения которого в большинстве технологических процессах применяются поверхностно-активные вещества (ПАВ).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния коэффициент поверхностного натяжения жидкости на динамики осаждения монодисперсного кластера капель с заранее заданным дисперсным составом. В экспериментах в качестве жидкости использовалась дистиллированная вода. Для изменения коэффициента поверхностного натяжения жидкости использовали додецилсульфат натрия.

Для исследования динамики осаждения монодисперсного кластера капель был разработан способ, заключающийся в импульсной подаче жидкости из сосуда через набор капилляров одинакового диаметра, равномерно расположенных на нижней крышке сосуда. Сосуд, выполненный в виде замкнутой емкости, заполняется через патрубок, размещенный на верхней крышке сосуда, заранее приготовленным раствором ПАВ в жидкости с заданной концентрацией с возможностью полного вытеснения воздуха из сосуда через капилляры и патрубок. Путем медленного повышения давления раствора в сосуде с помощью поршня, перемещаемого микрометрическим винтом, формировали устойчиво висящие на концах капилляров капли. После путем создания в растворе импульса давления обеспечивали одновременный отрыв капель от капилляров с образованием кластера. Визуализацию процесса осаждения кластера капель осуществляли с помощью двух скоростных видеокамер.

Получены новые результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения монодисперсного кластера капель в воздушной среде в следующем диапазоне определяемых и определяющих параметров: диаметр капель в кластере $d = (1.6 \div 2.2)$ мм, начальный диаметр кластера $D = 3$ см, начальная объемная концентрация капель в кластере $C = (0.0056 \div 0.024)$, число капель в кластере $N = (37 \div 60)$, коэффициент поверхностного натяжения жидкости $\sigma = (33.5 \div 71.25)$ мН/м.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.

Литература

- [1] Асовский В.П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Научный вестник МГТУ ГА: Аэромеханика и прочность. –2009. –№ 138. – С. 142-149.
- [2] Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, №1. – С. 89-93.
- [3] Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S., Zharova I.K. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere // Arabian Journal of Geosciences. –2016. – Vol. 9. – Article number: 114.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ФОРМУ И СКОРОСТЬ ВСПЛЫТИЯ ГРУППЫ МОНОДИСПЕРСНЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Архипов В.А., Богданов С., Борзенко Е.И., Усанина А.С.

Томский государственный университет, Пермь
usaninaanna@mail.ru

Пузырьковые течения встречаются в различных технологических и промышленных (химических, пищевых, полимерной и т.д.) процессах и устройствах (сушка методом распыления, барботажные аэраторы, аппараты с механическим перемешиванием, воздушно-пузырьковые колонны, кавитация и др.) [1-3]. Динамика (скорость, коэффициент сопротивления, траектория пузырьков) всплытия группы газовых пузырьков в жидкости определяется свойствами поверхности на границе раздела фаз жидкость-газ (ее подвижностью, коэффициентом поверхностного натяжения). Одним из способов изменения свойств межфазной границы является введение поверхностно-активного вещества (ПАВ) в жидкость. Молекулы поверхностно-активного вещества адсорбируются на поверхности пузырька, уменьшая его подвижность. Вследствие этого интенсивность циркуляции свободной поверхности в пузырьке падает, а в предельном случае сильного влияния поверхностно-активного вещества циркуляция вообще тормозится, и пузырек начинает двигаться как твердая сфера [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия группы монодисперсных пузырьков воздуха диаметром $\sim 1.5\div 2$ мм в жидкости, содержащей поверхностно-активное вещество. Экспериментальная установка для исследования процесса всплытия совокупности газовых пузырьков в жидкости состоит из кюветы с прозрачными плоскопараллельными стенками, устройства для создания группы пузырьков и системы видео визуализации процесса. Эксперименты проведены для дистиллированной воды и глицерина. В качестве поверхностно-активного вещества использовался лаурилсульфат натрия концентрацией $3.15 \cdot 10^{-4} \div 6.3 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Полечены новые экспериментальные данные по стационарной скорости всплытия группы пузырьков при различной концентрации поверхностно-активного вещества в жидкости. Показано уменьшение скорости всплытия пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества по сравнению со скоростью пузырьков, всплывающих в чистой жидкости (без ПАВ). Обнаружено изменение формы и размера пузырька при введении поверхностно-активного вещества в жидкость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10028, <https://rscf.ru/project/22-79-10028/>.

Литература

- [1] Бошенятов Б.В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 6. – С. 156-160.
- [2] Донцов В.Е. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в жидкости с пузырьками из смеси азота и углекислого газа при наличии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16, № 1. – С. 89-101.
- [3] Трушин А.М., Дмитриев Е.А., Акимов В.В. Механика образования микропузырьков при диспергировании через поры микрофильтрационных мембран // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – Т. 45, № 1. – С. 28-34.
- [4] Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика – Москва. 1959. – 699 с.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ДИСПЕРСНОСТЬ КАПЕЛЬ В ФАКЕЛЕ РАСПЫЛА ФОРСУНКИ

Архипов В.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
k.g.perfiljeva@yandex.ru

Количественные характеристики дисперсного состава жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла форсунок представляют интерес для широкого спектра отраслей техники и технологий. В частности, при расчете внутрикамерных процессов в двигателях [1, 2], в процессах орошения [3] и пожаротушения распыленной жидкостью [4]. Для повышения эффективности данных технологий необходимо уменьшение размеров капель распыливаемых жидкостей. На процесс диспергирования жидкостей значительное влияние оказывают способы распыливания и физические параметры жидкости.

В настоящее время для генерации жидко-капельного аэрозоля с заданным дисперсным составом существует большое количество специально сконструированных распыливающих устройств, например, центробежные, струйные и эжекционные форсунки. Из всего многообразия способов широкое распространение получили технологии с использованием эжекционных форсунок, обеспечивающих пневматическое распыливание.

Одним из основных физических параметров жидкости, влияющих на дисперсный состав жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла форсунки, является коэффициент поверхностного натяжения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния коэффициента поверхностного натяжения жидкости на дисперсный состав жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла эжекционной форсунки. В экспериментах в качестве жидкости использовалась дистиллированная вода. Для изменения коэффициента поверхностного натяжения использовали додецилсульфат натрия и эфир этиловый уксусной кислоты в качестве поверхностно-активных веществ (ПАВ). Исследования проводились на двух модельных форсунках: ЭФ-1 – газовый тракт выполнен в виде конфузора и ЭФ-3 – тангенциальная подача газа, обеспечивающая закрутку потока. Для измерения дисперсного состава жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла форсунки использовался оптический метод малых углов индикатрисы рассеяния.

Получены новые результаты экспериментального исследования по влиянию типа и концентрации ПАВ на количественные характеристики дисперсного состава жидко-капельного аэрозоля в факеле распыла эжекционных форсунок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00092, <https://rscf.ru/project/22-79-00092/>.

Литература

- [1] Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Т. 1 Теория рабочих процессов – Москва, 1995. – 368 с.
- [2] Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. – Москва, 1964. – 526 с.
- [3] Воеводина Л. А. Тенденции развития и перспективы применения капельного орошения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – №. 3. – С. 90-102.
- [4] Захматов В.Д. Перспективные современные разработки техники для тушения лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 2. – С. 47–49.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНОКРАТНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА МИШЕНЕЙ

Балахнин А.Н.¹, Уваров С.В.¹, Банникова И.А.¹, Вшивков А.Н.¹, Ерошенко А.Ю.²,
Шаркеев Ю.П.², Наймарк О.Б.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

balakhnin.a@icmm.ru

Проведено экспериментальное исследование ударно-волнового нагружения, создаваемого однократным лазерным импульсом, на развитие внутренней поврежденности металлических мишеней. В качестве источника лазерного импульса применяли высокоэнергетический наносекундный импульсный лазер Beamtch SGR-Extra-10 с энергией импульса до 10 Дж. В эксперименте варьировались параметры энергии импульса (от 5 до 10 Дж) и размеры пятна контакта: лазерный пучок фокусировался на фронтальной поверхности мишени в квадратное пятно 1x1 или 3x3 мм. Мишени представляли собой диски диаметром от 10 до 16 мм толщиной 0,6 – 0,9 мм, изготовленные из сплавов титана, циркония, алюминия. Воздействие лазером осуществлялось через тонкую водную завесу

В ходе эксперимента проводилось измерение скорости тыльной поверхности образца с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR. Исследование внутренней поврежденности и структуры материала мишеней осуществлялось на металлографических шлифах, изготовленных в поперечном сечении образца в зоне воздействия лазерного импульса в направлении распространения ударной волны.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности локализации внутренних повреждений, предшествующих отколу в циркониевом сплаве Э110, в исследованном диапазоне интенсивностей воздействия. Выявлены методические особенности эксперимента в данной постановке, оказывающие влияние на интерпретацию профилей скорости тыльной поверхности, фиксируемые доплеровским измерителем скорости VISAR.

Представления о закономерностях развития внутренней поврежденности материалов при однократном лазерном нагружении позволят предложить промышленные технологии поверхностного упрочнения металлов авиационного моторостроения в условиях широкодиапазонных воздействий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-79-30041).

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОАЛЕСЦЕНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Балдин М.Н., Н.С. Кондратьев, Д.С. Безверхий

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
matvej1999@gmail.com, kondratevns@gmail.com, solikamsk2000@gmail.com

Физико-механические свойства поликристаллических материалов существенным образом зависят от состояния их внутренней структуры [1]. Обработка металлов давлением преимущественно производится при повышенной температуре. Во время данного процесса активно реализуется динамический возврат, движущей силой которого является неоднородность запасённой на дефектах энергии. Во время возврата может происходить формирование относительно крупных субзёрен, которые впоследствии могут являться зародышами рекристаллизации и окажут значительное влияние на конечную внутреннюю структуру материала [2]. Выделяют два основных механизма формирования укрупнённых субзёрен – миграция малоугловых границ и коалесценция субзёрен. В рамках данной работы представлен способ описания процесса коалесценции с использованием расширенной статистической модели неупругого деформирования. Модель коалесценции основана на анализе, проведенном в работе Ли [3] и впоследствии дополненном с учётом туннельной диффузии в работе [4]. В работе используется оригинальная модель вращения субзёрен за счёт оседания дислокаций на малоугловых границах, предложенная в работе [5]. Для задания исходной геометрии зёрненной и субзёрненной структуры использовалось свободно распространяемое программное обеспечение Nperg, в основе которого лежат полиэдры Лагерра [6]. Начальные ориентации субзёрен генерировались на основе экспериментальных данных, полученных методом дифракции отраженных электронов (EBSD) и представленных в работе [7].

В ходе работы была реализована модель коалесценции, проведены численные эксперименты по моделированию неупругого деформирования с учетом коалесценции и установлено существенное влияние данного процесса на эволюцию субзёрненной структуры материала. В результате вычислений для представительного объема поликристалла меди было показано, что коалесценция на начальной стадии термомеханической значительным образом влияет на средний размер субзёрен и углы из взаимной разориентации при высоких температурах и низких скоростях деформирования.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596002).

Литература

- [1] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с.
- [2] Rollett A.D. Overview of modeling and simulation of recrystallization //Progress in materials science. – 1997. – Vol. 42 (1-4). – P. 79-99. DOI: 10.1016/S0079-6425(97)00008-X
- [3] Li J.C.M. Possibility of subgrain rotation during recrystallization // Journal of Applied Physics. – 1962. – Vol. 33 (10). – P. 2958-2965. DOI: 10.1063/1.1728543
- [4] Doherty R.D., Szpunar J.A. Kinetics of sub-grain coalescence—a reconsideration of the theory // Acta Metallurgica. – 1984. – Vol. 32 (10). – P. 1789-1798. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90235-9
- [5] Kondratev N.S., Trusov P.V. Multilevel models of inelastic deformation: determination of stable low angle boundaries //Materials Physics and Mechanics. – 2019. – Vol. 42 (6). – P. 784-796. DOI: 10.18720/MPM.4262019_10
- [6] Quey R., Renversade L. Optimal polyhedral description of 3D polycrystals: Method and application to statistical and synchrotron X-ray diffraction data //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 330. – P. 308-333. DOI: 10.1016/j.cma.2017.10.029
- [7] Lebensohn R.A. Orientation image-based micromechanical modelling of subgrain texture evolution in polycrystalline copper //Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56 (15). – P. 3914-3926. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.04.016

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (DIC) И РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Банников М.В., Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Игнатова А.М., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mbannikov@icmm.ru

Проведены эксперименты по циклическому нагружению образцов полимерного композиционного материала на основе углеволокна. Образцы изготовлены из углеродной ткани CW200-TW2/2 саржевого плетения с эпоксидной матрицей, с четным количеством пар слоев, ориентированных в противоположных направлениях относительно друг друга. Геометрия образцов представляла собой плоскую полосу с размерами 250x25x4 мм с отверстием в центральной части 6 мм диаметром, выполнявшим функцию концентратора напряжений.

В процессе нагружения проводился анализ полей деформации с помощью метода цифровой корреляции изображений (DIC) для определения областей с наибольшей локализацией деформации. Для определения значений размаха амплитуд нагружения, образцы были подвергнуты квазистатическому растяжению при постоянной скорости равной 1 мм в минуту. Концентраторы напряжений в виде отверстий в центральной части образца снижали предельную нагрузку до разрушения по сравнению с образцом без концентратора на 30%. При циклических испытаниях, максимальная амплитуда нагружения составляла 50-80% от максимальной разрушающей, коэффициент асимметрии цикла $R=0.1$, частота испытаний 10 Гц.

Для проведения томографии использовали источник синхротронного рентгеновского излучения (СИ) из вигглера, установленного на ускорителе заряженных частиц ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН). Угловой разброс СИ составил 0,1 миллирадиан, полная мощность излучения 0,1 кВт, пространственное разрешение для коротковолнового диапазона (5–30 кэВ) составило 1 мкм.

Выявлено, что при растяжении заготовки из композиционного материала с увеличением степени деформации размер макродефектов укрупняется, а фактор их дисперсности снижается от 1,77 до 0,74. Это позволяет утверждать о наличии общей тенденции к размерной эволюции дефектов в макроструктуре композита, темп развития которой зависит от равномерности распределения напряжений в материале в процессе деформации.

Установлено, что разница в степени деформации отражается на распределение дефектов на диаграмме в координатах «расстояние между элементами пористости-морфометрические параметры пористости». Деформация в области концентрации напряжений приводит преимущественно к сокращению расстояния между элементами пористости, тогда как деформация вне концентратора напряжений обеспечивает преимущественно морфометрические изменения дефектов.

Обнаружено образование микротрещин в матрице материала в отдельных слоях вблизи концентраторов напряжений при циклическом деформировании, которые при дальнейшем нагружении сливаются в макротрещины, пронизывающие весь материал.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-79-30041).

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
malgacheva@icmm.ru, usv@icmm.ru, naimark@icmm.ru, buv@icmm.ru

Импульсное нагружение жидкостей, когда скорость деформации достигает значений $10^4 - 10^7$ 1/с), позволяет исследовать структурные механизмы релаксации и обусловленные ими закономерности переноса импульса. В настоящей работе проводится экспериментальное исследование прочностных и реологических свойств ряда жидкостей (полярных и неполярных), применяемых в различных отраслях техники и промышленности, при высокоскоростном нагружении. Приводятся результаты анализа механизмов релаксации при исследовании профилей скорости свободной поверхности жидкостей, подвергнутых ударно-волновому нагружению методом электрического взрыва проводника (ЭВП) и с использованием техники взрывного генератора (ВГ), реализованных на базе институтов «ИМСС УрО РАН» (Пермь) и «ФИЦ ПХФ и МХ» (Черноголовка) [1-3]. Установленные закономерности реологического поведения, разрушения жидкостей обнаруживают признаки автомодельности, характерные также для поведения твердых тел (степенная универсальность квазипластического фронта, зависимости откольной прочности, асимптотики вязкости), позволяют установить связь механизмов структурной релаксации с особенностями формирования волновых фронтов в жидкостях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590016 и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (г.р. № АААА-А19-119013090021-5).

Литература

- [1] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушения жидкостей при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, №3. – С. 69-77.
- [2] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В. Импульсное сжатие и растяжение додекана и минеральных масел при ударно-волновом воздействии // ЖТФ. – 2018. – Т. 88, Вып. 4. – С. 514-520.
- [3] Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Y.V. Surfactant solutions behavior under electric explosion wire loading // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V.33. – P. 1146–1151.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИТНОГО И ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Банщикова С.И., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д., Халилов Р.И., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
banshchikov.s@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Жидкометаллические стенды активно применяются для исследования различных процессов [1], возникающих в установках и элементах конструкции контуров теплоносителя атомных станций на быстрых нейтронах [2]. Одной из важнейших задач на АЭС данного типа является совершенствование конструкций систем измерения расхода жидкого натрия. Наиболее перспективным является корреляционная методика определения расхода, изучаемая в данной работе. Для ее реализации необходимо экспериментально исследовать гидродинамические процессы, возникающие в канале расходомера. Результаты необходимы для получения данных для верификации математического моделирования, отработки измерительной методики и оценки точности измерения в условиях воздействия электромагнитных помех. Экспериментальная установка состоит из канала, который охвачен индукторами, генерирующими вращающиеся магнитные поля. Поля создают вихревые течения в области действия индукторов. Установка встроена в жидкометаллический контур с внутренним диаметром 20 мм, что позволяет создавать транзитное течение через ее канал. Контур состоит из системы хранения металла, расширительной емкости, вакуумной системы, газовой системы, системы очистки. Регулирование расхода производится клапаном. Давление измеряется дифференциальным манометром «Метран». В контуре имеется система стабилизации температуры с помощью водяного охлаждения и контролируемых терморпар. Электромагнитный насос бегущего поля с источником питания соединяется с трубопроводом контура с помощью фланцев. Все показания контура передаются на компьютер с помощью плат сбора данных «National Instruments» и обрабатываются в системе «LabView». В качестве источников питания для установки и насоса использовались частотные регуляторы напряжения «Hyundai, N700E» с фильтрами, которые позволяют выдавать стабильное контролируемое напряжение заданной частоты. Жидкий металл представляет собой галлиевую эвтектику, свойства которой хорошо известны [3]. Основное преимущество этой эвтектики в том, что она имеет температуру плавления в 17 градусов по Цельсию и не токсична. Ультразвуковой доплеровский анемометр [4] применяется для измерения скорости жидкого металла в канале установки. Использование фильтров с частотными регуляторами напряжения позволяет применять данный тип анемометрии. На установке ведутся исследования взаимодействия транзитного течения, созданного электромагнитным насосом, с вихревыми течениями, генерируемыми индукторами вращающегося магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

- [1] Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM's two-loop liquid sodium facility // *Magnetohydrodynamics*. – 2016. – V. 52. – P. 87-94.
- [2] Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
- [3] Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V. et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy// *Fluid Phase Equilibria*. – 2018. – V. 465. – P. 1-9.
- [4] Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // *Flow measurement and instrumentation*. – 2020. – V. 75. – P. 101786.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЕ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУД

Барях А.А.¹, Девятков С.Ю.¹, Михайлов В.О.², Тимошкина Е.П.²

¹Горный институт УрО РАН, Пермь

²Институт физики Земли РАН, Москва

sd@mi-perm.ru

Благоприятные горно-геологические условия Старобинском месторождении калийных солей (Беларусь) позволяют применять системы обработки длинными очистными забоями, которые обуславливают интенсивную деформацию земной поверхности. Для контроля развития процесса сдвижения применяются геодезические методы, позволяющие определить значения деформаций земной поверхности на отдельных линейных участках. В последние годы все шире используются площадные измерения скоростей оседаний с помощью SAR интерферометрии.

На Старобинском месторождении площадной мониторинг оседаний земной поверхности осуществляется путем анализа радарных снимков спутников европейского космического агентства Сентинель-1 в течение бесснежного периода года. На территории месторождения методом суммирования смещений, полученных по парным интерферограммам, выявлено 44 области значимых оседаний земной поверхности. Построены профили через каждую из мульд сдвижения и оценены максимальные амплитуды субвертикальных оседаний, связанных с подземной разработкой калийных солей.

Целью представленных исследований являлось сопоставление результатов математического моделирования динамики сдвижения земной поверхности в процессе подвигания очистного забоя лавы с данными радарной интерферометрии. Геомеханическая модель учитывала основные особенности строения подработанного массива, а также обрушение пород кровли отработываемого пласта с заполнением ими выработанного пространства лавы. Условием обрушения пород кровли являлось раскрытие контакта между слоями при достижении его границ трещинами сдвига или формирование области растягивающих напряжений на обнажении. Математическое моделирование осуществлялось в упруго-пластической постановке с численной реализацией методом конечных элементов.

В ходе движения фронта очистных работ вначале наблюдается рост оседаний с последующей их стабилизацией до величины, определяемой технологическими параметрами ведения горных работ и физико-механическими свойствами обрушенных пород. При этом каждая точка земной поверхности испытывает знакопеременные горизонтальные деформации: при приближении фронта - растяжения, при удалении – сжатия. Выполненное геомеханическое моделирование в полной мере отражает данный процесс.

Сравнение результатов математического моделирования с данными спутниковой радарной интерферометрии показало хорошую пространственную корреляция областей максимальных оседаний за анализируемые интервалы времени, которые изменялись от 13 до более чем 200 суток. При этом наблюдается приемлемое согласование как вида формируемых мульд сдвижения вдоль расчетного профиля в целом, так и развития процесса оседаний земной поверхности в его отдельных точках.

Таким образом, выполненный анализ свидетельствует об адекватности математического описания процесса деформирования породного массива, указывает на возможность прогнозировать процесс сдвижения земной поверхности при обработке калийных руд длинными очистными забоями.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Баяндин Ю.В.¹, Банников М.В.¹, Головин М.С.^{1,2}, Уваров С.В.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

buv@icmm.ru, petrov@org2.ru

Целью работы является разработка структурно-феноменологической модели композиционного материала с учетом накопления повреждений и численное моделирование ячейки периодичности для определения эффективных упругих модулей, определение диаграмм деформирования и характеристик прочности для случая растяжения и сдвига в плоскости образца. Верификация модели деформационного поведения и разрушения композита проводилась на основе данных экспериментов по измерению скорости звука в углепластиках с целью определения деградации эффективных упругих модулей, обусловленной накоплением повреждений.

В прикладном пакете конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics 6.0 проводилось численное моделирование ячейки периодичности для однонаправленного и тканного композиционного материалов с учетом накопления повреждений. Для определения полной матрицы упругости решалась задача статики на одноосное растяжение/сжатие и на сдвиг в трех направлениях. Эффективные модули вычислялись как средние по соответствующим граням напряжения отнесенные к полным деформациям (продольной для одноосного нагружения, сдвиговой для случая сдвига). Модули Юнга соответствуют экспериментальным значениям при растяжении образцов (ГОСТ 25.601-80). Значение модуля сдвига также было получено методом определения механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования для испытания образца на растяжение с укладкой $\pm 45^\circ$ (ГОСТ 32658-2014). Дополнительно предложена формула для вычисления модуля сдвига в плоскости по данным квазистатических экспериментов. Значения модулей, полученных методом усреднения свойств однонаправленных слоев, хорошо согласуются с результатами численного моделирования для ячейки периодичности композита.

С целью верификации модели проводился эксперимент по определению скорости звука на универсальной нагружающей машине BISS-00-100 для образца ПКМ (углепластик) в виде полосы шириной 25 мм, толщиной 2 мм и длиной 250 мм. На образце были закреплены датчики системы измерения акустической эмиссии Vallen AMSY-6, выступающие в роли излучателей и микрофонов для измерения скорости звука. Ход эксперимента заключался в ступенчатом нагружении образца с постоянной нагрузкой и измерением на каждом этапе значения продольной скорости звука в образце. Образец был последовательно нагружен от 5 до 50 кН с неравномерным шагом по нагрузке (в начале эксперимента шаг по 5кН, на заключительных этапах шаг уменьшен до 1 кН для получения более точных данных в критической области). Разработанная модель адекватно описывает экспериментально наблюдаемое падение скорости звука образца в соответствие с численным моделированием деградации эффективных упругих свойств для ячейки периодичности углепластика. Значение прочности вдоль оси нагружения соответствует резкому падению модуля упругости, обусловленному деградацией акустических свойств вследствие накопления повреждений, и согласуется с экспериментальными данными по квазистатическому растяжению образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30041).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ПАВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ СДВИГА

Баяндин Ю.В., Ефремов Д.В., Банникова И.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

buv@icmm.ru, efremov.d@icmm.ru

Работа посвящена исследованию реологических свойств жидкостей, применяемых в технологии гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих ПАВ (Сурфогель марки Д, тип 70-100, производство АО «Полиэкс») и на основе гуара. Вязкость представленных жидкостей при сверхмалых скоростях деформации исследовалась с помощью вискозиметра с падающим шаром (по методу Стокса). Реологические свойства жидкостей при скоростях сдвига до 1000 с^{-1} исследовались с помощью реометра, снабженного измерительной системой «коаксиальные цилиндры». Испытания с осциллирующими напряжениями (динамические испытания), производились на реометре, с измерительной системой «конус-плоскость». Исследование поведения жидкостей в условиях динамического нагружения при интенсивных кратковременных воздействиях осуществлялись с помощью экспериментальной установки оригинального изготовления по электрическому взрыву проводника.

Полученные различными методами экспериментальные результаты исследования представленных жидкостей хорошо согласуются между собой. Установлено, что исследуемые жидкости проявляют псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ показала более высокую стабильность реологических свойств, заключающуюся в слабой зависимости от амплитуды осцилляций и частоты осцилляций в отличие от жидкости на основе гуара, утратившей упругие свойства при частоте осцилляций 5,5 Гц, ранее было показано, что именно упругие свойства определяют несущую способность расклинивающего материала. Установлено, что исследуемые жидкости проявляют псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации на фронте волны сжатия (при давлениях 30 – 40 МПа). Также определены значения откольной прочности, которые могут быть учтены при образовании кавитационных пузырей в возможных зонах разрежения в процессах ГРП [1,2]. Предложено соотношение в виде степенного закона для зависимости вязкости от скорости сдвига и давления в жидкости, адекватно описывающее экспериментальные данные в широком диапазоне изменения скорости сдвига и давлений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ АААА-А19-119013090021-5)

Литература

- [1] Ефремов Д. В., Банникова И. А., Баяндин Ю. В., Крутихин Е. В., Журавлёв В. А. Экспериментальное исследование реологических свойств жидкостей для гидроразрыва пласта // Вестник Пермского университета. Физика. – 2020. – № 4. – С. 69–77. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77
- [2] Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Савельева Н.В., Банникова И.А., Ледон Д.Р., Ефремов Д.В., Крутихин Е.В., Журавлев В.А. Экспериментальное и теоретическое исследование реологических свойств неньютоновских сред (растворов вязкоупругих пав) при квазистатическом и динамическом нагружениях // Вестник пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 1. – С. 26-46. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.1.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИКУ И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ

Белавина Е.А.^{1,2}, Бердюгин Д.А.², Ерпулев А.А.², Пятницкая Н.Ю.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва
belavinaea@gmail.com, pyatnitskayanyu@gmail.com

В настоящее время актуальным стоит вопрос поиска альтернативных решений в области хранения, наработки и воспроизводства ядерного топлива. Исследования ведутся как в области ядерных технологий (ИЖСР, БРЕСТ), так и в области термоядерных установок (ITER, ТОКАМАК), в которых, в качестве рабочего тела рассматривается возможность применения расплавленных солей на основе фторидов. В связи с этим, комплексное исследование, состоящее из изучения свойств расплавов фторидных солей, а также создание надежной экспериментальной и численной базы для верификации инженерных расчётов, представляют особый интерес. Работа в этой области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ»-ОИВТ РАН.

Целью данной работы является изучение совместного влияния магнитного поля и свободной конвекции в имитаторах расплава соли при определенном соотношении параметров Re , Gr и Ha , которое в свою очередь может приводить к образованию возвратных течений у стенки, и, как следствие, развитию неустойчивости в потоке и его дополнительной турбулизации на фоне практически полностью подавленной турбулентности с образованием вторичных вихревых структур. В рамках работы, была получена зависимость $Nu(Gr, Re)$ при $Pr=6$ для круглой вертикальной трубы. Результат был сопоставлен с известной экспериментальной зависимостью, при этом было получено хорошее совпадение результатов DNS расчета и эксперимента [1]. Приведена оценка границы начала влияния свободной конвекции на теплообмен в круглой горизонтальной трубе при $Re=5000-20000$ при $Pr=6$. В результате оценки интенсивности пульсаций безразмерных скорости, температуры, давления обнаружено, что свободная конвекция способствует подавлению и существенному перераспределению интенсивности пульсаций теплогидравлических параметров по сечению трубы. В размерном виде интенсивность пульсации температуры растет по мере увеличения числа Gr . В условиях изотермического турбулентного потока под воздействием поперечного магнитного поля происходит рост интенсивности температурных пульсаций. В условиях сильного поперечного магнитного поля и высокого теплового потока образуются возвратные течения у стенки, которые приводят в дальнейшем к образованию вторичных вихревых структур, оси которых параллельны вектору магнитной индукции. В последствии происходит рост интенсивности пульсаций теплогидравлических характеристик потока, которые подавляются магнитным полем. Совокупность эффектов, вызванных совместным влиянием магнитного поля и свободной конвекции, приведет к появлению термических напряжений в материале стенки канала, в том числе циклических, что может быть причиной разрушения конструкции, особенно энергонагруженных систем охлаждения термоядерных реакторов. Была проведена оценка достижимости в рамках экспериментального исследования границы начала влияния термогравитационной конвекции на поток расплава соли в вертикальных каналах под действием поперечного магнитного поля, применительно к реакторным установкам нового поколения.

Литература

[1] Belavina E.A., Belyaev I. A., Kotlyar A. V., Listratov Ya. I., Sviridov V.G. Heat transfer in mixed convection of molten salt in the presence of magnetic fields. J. Phys. Conf. Ser, 2018, 012034

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ВЕРШИНОЙ ТРЕЩИНЫ С ПОМОЩЬЮ АТОМИСТИЧЕСКОГО И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Белова О.Н.¹ Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королев, Самара
belovaonik@yandex.ru

В работе выполнено атомистическое моделирование полей напряжений около вершины трещины и бокового надреза с помощью метода молекулярной динамики. Целью исследования является сравнение атомистических полей напряжений для монокристаллических ГЦК меди и алюминия с полями напряжений, полученными из конечно-элементного расчета в пакете SIMULIA Abaqus. Атомистическое моделирование было реализовано для чисто растягивающих нагрузок и нагрузок в смешанном режиме (I + II смешанные нагрузки) с помощью симулятора LAMMPS, реализующего метод молекулярной динамики. В атомистических расчетах рассматриваются пластины с центральными трещинами и одним краевыми вырезом. Образцы моделируются из кристаллической гцк-меди и гцк-алюминия. С помощью моделирования молекулярной динамики получены компоненты тензора напряжений и построены окружные распределения полей напряжений в непосредственной окрестности вершины трещины и надрезов в алюминии и меди. На основе атомистических полей напряжений с помощью переопределенного метода, примененного к ряду Уильямса, найдены амплитудные множители распределения. Аналогичная процедура проведена на данных конечно-элементного решения. Проведено сравнение полученных результатов. Выявлены основные закономерности, вытекающие из сравнительного анализа атомистического и континуального подходов (рис.1). Основной вывод, к которому можно прийти после атомистического моделирования, заключается в том, что распределения напряжений, заданные классической линейной механикой разрушения, качественно и количественно идентичны распределениям напряжений молекулярной динамики [1,2]. При сравнении расчетов для меди и алюминия получили качественно одинаковые распределения компонент тензора напряжений, т.е. поля не зависят от структуры материала для материалов, принадлежащих одной группе сингонии.

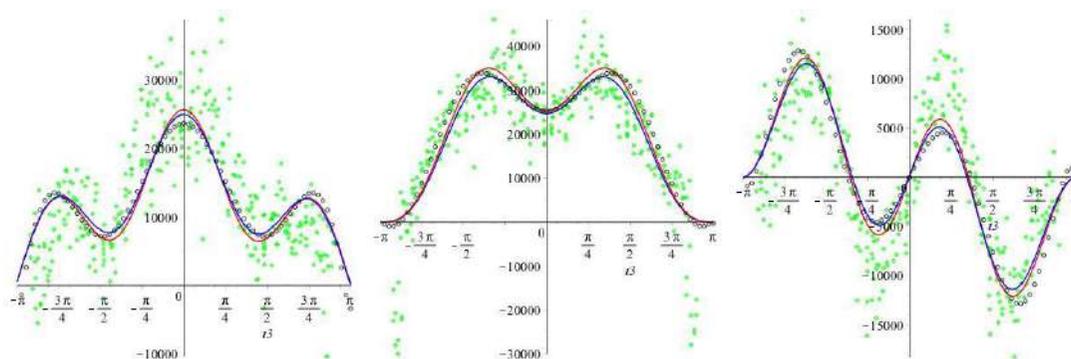


Рис. 1. Угловые зависимости компонент тензора напряжений вблизи вершины трещины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 21-11-00346).

Литература

- [1] Stepanova, L.V., Belova, O.N. Coefficients of the Williams power expansion of the near crack stress field in continuum linear elastic fracture mechanics at the nanoscale// Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022. – V. 119, 103298.
- [2] Stepanova, L.V., Belova, O.N., Bronnikov, S.A. Atomistic Determination of Fracture Mechanics Parameters// Procedia Structural Integrity, 2021. – V. 32, 261-272.

О РЯБИ ФАРАДЕЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Белоножко Д.Ф.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова»
belonozhko@mail.ru

Изучались закономерности образования периодической структуры (ряби Фарадея [1]) на свободной поверхности горизонтального слоя жидкости заданной толщины d , совершающего малые вертикальные вибрации фиксированной частотой $\nu = \omega/\pi$. Слой жидкости считался вертикально стратифицированным с линейным увеличением плотности по глубине.

Задача решалась в неинерциальной системе отсчета, соотнесенной с декартовой прямоугольной системой координат $Oxyz$, вибрирующей вместе с жидким слоем. Ось Oz считалась направленной вертикально вверх против поля силы тяжести g . На поверхности задавались значения плотности жидкости ρ_0 и коэффициент её поверхностного натяжения γ . Использовалось приближение Буссинеска [2], учитывающее изменение плотности жидкости только при массовых силах. Задача формулировалась в линейном приближении по возмущению свободной поверхности $z = \xi(t, x)$ (зависимостью от y пренебрегалось):

$$\begin{aligned} -d < z < 0: \quad \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \\ z = 0: \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = v; \quad -\rho_0 \xi \left(1 - \frac{4a\omega^2}{g} \cos(2\omega t) \right) g + p = -\gamma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial s}{\partial t} - \nu R = 0; \\ z \rightarrow -d: \quad v = 0. \end{aligned}$$

Здесь $u \equiv u(t, x, z)$ и $v \equiv v(t, x, z)$ - горизонтальная и вертикальная компоненты поля скоростей; $p \equiv p(t, x, z)$ - возмущения к равновесному распределению давления в жидкости; $s \equiv s(t, x, z)$ - возмущения к равновесному распределению плотности в жидкости; R - взятый с минусом вертикальный градиент плотности, деленный на ρ_0 ; a - амплитуда вертикальных колебаний жидкого слоя.

В результате решения были определены условия реализации параметрического резонанса различных порядков. Выяснилось, что при сильной стратификации низкочастотные вертикальные колебания жидкого слоя вызывают рисунок ряби Фарадея, связанный не с главным параметрическим резонансом [3], а с его обертонами. Диапазон соответствующих частот не зависит от глубины слоя жидкости, а полностью определяется значением частоты плавучести - частоты с которой будет колебаться около своего среднего положения воображаемая маленькая частичка той же плотности, что и плотность жидкости на соответствующем среднем уровне. Для теоретического исследования параметрических резонансов высоких порядков крайне важно развитие построенной модели на случай вязкой жидкости [4].

Литература

- [1] Faraday M. //Phil. Trans. Roy. Soc., London. 1831. V.121. P. 209-318
[2] А.А. Очиров, Ю.Д. Чашечкин //Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т.58. № 5. С.1-9.
[3] Benjamin T. B. The stability of the plane free surface of liquid in a vertical periodic motion//Proc. Roy. Soc. A. 1954. V.225, No4, P. 505-515
[4] Белоножко Д.Ф., Апарнева А.В. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2017. № 6. 1760401

МЕХАНИЗМ ПЕРЕСТРОЙКИ МАЛЫХ ГЦК КРИСТАЛЛОВ В ИКОСАЭДРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Белошапка В.Я.

Мелитопольский государственный университет, Бердянск

bel_val1955@mail.ru

Потеря стабильности структуры с последующей её перестройкой - часто встречающееся явление в физике наносистем. При этом, механизмы трансформации структуры, как правило, сложны и к настоящему времени недостаточно изучены. Сложность их экспериментального изучения связана с малыми временами процесса перестройки. Монокристаллические частицы малых размеров ГЦК металлов метастабильны и трансформируются в пентагональные структуры в виде икосаэдров (Ic) с гранями (111). В работе методами молекулярной динамики с использованием ЕАМ потенциала изучен механизм структурной перестройки при трансформации ГЦК→Ic таких металлов как: Ni, Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Al, Pb. Исходные ГЦК частицы имели форму кубооктаэдров с магическим числом атомов от 13 до 2089. При этом, образовавшиеся икосаэдры всегда имели идеальную пентагональную структуру. По температурным зависимостям потенциальной энергии $E_p(T)$ определялась температура ГЦК→Ic перехода и величина скачка dE_p при этом. В таблице приведены данные о температуре и величине dE_p при трансформации структур с различным числом атомов для изученных металлов.

Число атомов	Cu T(K), dE(ev)	Ni T(K), dE(ev)	Au T(K), dE(ev)	Pt T(K), dE(ev)	Pd T(K), dE(ev)	Al T(K), dE(ev)	Ag T(K), dE(ev)	Pb T(K), dE(ev)
13	1, 0.086	1, 0.11	1, 0.35	1, 0.283	1, 0.191	1, 0.09	1, 0.185	1, 0.32
55	1, 0.08	1, 0.084	1, 0.168	1, 0.097	1, 0.112	1, 0.05	1, 0.085	1, 0.133
147	1, 0.057	22, 0.039	252, 0.018	876, 0.001	292, 0.033	372, 0.017	1, 0.051	142, 0.019
309	135, 0.025	414, 0.03	459, 0.014	---	720, 0.023	---	427, 0.018	529, 0.015
561	753, 0.019	726, 0.027	---	---	---	---	---	---
923	932, 0.012	---	---	---	---	---	---	---

Для анализа механизма перестройки состояние сегментов структур пошагово регистрировалось. Кубооктаэдр состоит из 8 правильных тетраэдров (наружные грани (111)) и 6 правильных 4-х угольных пирамид (наружные грани (100)) с общими вершинами в центре структуры. Каждая из 6 пирамид, в свою очередь, может быть представлена из 2 неправильных тетраэдров, основания которых образуют основание пирамиды. Икосаэдр, в свою очередь, состоит из 20 равнобедренных тетраэдров (наружные грани (111)) с общими вершинами в центре. Установлено, что при трансформации все 20 тетраэдров в исходной структуре кубооктаэдра, сохраняя свою индивидуальность, изменяя телесные углы при вершинах до 0.6283 sr., и вращаясь вокруг центра икосаэдра, превращаются в 20 одинаковых равнобедренных тетраэдров, образующих икосаэдр. При этом, 12 неправильных тетраэдров в исходной структуре изменяют основание с (100) на (111). При перестройке тетраэдра в тетраэдр список атомов, образующих тетраэдры, сохраняется. Перестройка происходит бездиффузионно и длится не более 10^{-10} с. Механизм является универсальным для частиц различных размеров всех изученных металлов. Уменьшение свободной поверхностной энергии структур при перестройке ГЦК→Ic превосходит рост упругой объемной энергии.

ВЛИЯНИЕ ВТОРОГО РЕЗОНАНСА ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОБОБЩЕННОГО МАЯТНИКА КАПИЦЫ

Беляев А.К.¹, Полякова О.Р.², Товстик Т.П.¹

¹*Институт Проблем Машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

²*Общественная организация научных исследований «Метагалактические Науки»
Московской области, Подольск*

vice.ipme@gmail.com, ksenpolyaor@yandex.ru, tovstik_t@mail.ru

Из классических работ А. Стефенсона [1] и П.Л. Капицы [2] известно, что обращённое положение маятника в поле силы тяжести при достаточно быстрых вертикальных вибрациях его основания становится устойчивым. В настоящее время активно разрабатываются обобщения этой задачи на случай моделей многозвенного и деформируемого маятника.

Настоящая работа является продолжением задачи, поставленной в работе [3], где вместо маятника Капицы взят консольно закреплённый гибкий стержень достаточно большой длины, то есть за пределами эйлерового критического значения. В отсутствие вибраций основания в поле силы тяжести вертикальное положение такого стержня неустойчиво.

Задача малых поперечных колебаний продольно сжатого гибкого стержня на вибрирующем основании решается путём введения вспомогательной краевой задачи о бифуркации статического равновесия стержня под действием собственного веса со свободным верхним концом и зажатым нижним концом.

В случае одномодового приближения, как и в классической постановке Капицы, задача приводится к уравнению Матье. Для двухмодового приближения задача сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Для определения условий устойчивости решения вводится медленное время и двухмасштабное асимптотическое разложение.

В случае растяжимого стержня задача также сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Но, так как сила продольного сжатия в сечении стержня, входящая в уравнение поперечных колебаний, находится из краевой задачи для продольных колебаний, то вид коэффициентов этой системы уравнений усложняется. Для коэффициентов, сложным образом зависящих от частоты вибраций основания, применена аппроксимация Паде [4].

Установлено влияние сжимаемости стержня на условие устойчивости. При приближении частоты вибраций основания к резонансным частотам продольных упругих колебаний стержня влияние продольных волн увеличивается, что показано на численных примерах.

Для нахождения области притяжения устойчивого решения задачи, в качестве начальных условий взяты формы равновесного положения изогнутого под собственным весом стержня в геометрически нелинейной постановке [5, с. 528].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-51-S52001 МНТ-а).

Литература

- [1] Stephenson A. On induced stability // *Phil. Mag.*, 1908, Vol. 15, pp. 233 – 236.
- [2] Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // *Успехи физических наук*. 1951. Т. 44. № 1, С. 7 – 20.
- [3] Морозов Н.Ф., Беляев А.К., Товстик П.Е., Товстик Т.П. Устойчивость вертикального стержня на вибрирующей опоре // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 482. – № 2. – С. 155 – 159.
- [4] Андрианов И.В., Баранцев Р.Г., Маневич Л.И. Асимптотическая математика и синергетика – М., 2020. – 300 с.
- [5] Поляхов Н.Н., Товстик П.Е., Зегжда С.А., Юшков М.П. Теоретическая и прикладная механика. Т. 2. Динамика. Некоторые прикладные вопросы теоретической механики – СПб., 2022. – 548 с.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В МЕТОДАХ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВОВ

Бердников В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
berdnikov@itp.nsc.ru

Монокристаллы полупроводниковых и других многофункциональных материалов являются основой создания изделий микроэлектроники, лазерной и другой техники. Подавляющее большинство монокристаллов получают из расплавов методами направленной кристаллизации, к которым относятся методы Чохральского, Бриджмена-Стокбаргера, Степанова, бестигельной зонной плавки (БЗП) и горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК). Во всех этих методах на качество кристаллов влияет конвективный тепло- и массообмен в расплаве, особенно вблизи фронта кристаллизации (ФК), и тепловая история кристалла, т.е. поля температуры в кристаллах в процессе роста [1-7]. От особенностей локального теплообмена зависят формы фронтов кристаллизации и поля температуры и градиентов температуры в затвердевшем материале, от которых зависит однородность кристаллографических характеристик кристаллов. Непосредственно на ростовых установках изучать конвективные процессы в расплавах и теплообмен кристаллов с окружающей средой в ростовой камере практически невозможно. Поэтому целесообразно исследования основных закономерностей конвективных процессов проводить комплексно, сочетая физическое и численное моделирование [2-7]. В Институте теплофизики СО РАН были проведены исследования гидродинамики и теплообмена экспериментально и численно в условиях, характерных для основных методов направленной кристаллизации. Изучено влияние конвективного теплообмена на ФК и на поля температуры в кристаллах. Исследования выполнены в широком диапазоне значений чисел Прандтля: $0,05 \leq Pr \leq 2700$, в режимах тепловой гравитационно-капиллярной и смешанной конвекции. При различных относительных высотах слоев расплавов в неподвижных и вращающихся тиглях. При различных отношениях радиусов тиглей и кристаллов исследовано влияние перепадов температуры между стенками тиглей и ФК и скоростей вращения кристаллов на формы ФК. Определены границы переходов от ламинарных к турбулентным режимам течения. В нестационарных режимах обтекания ФК изучено влияние амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры на мгновенные формы ФК.

Литература

- [1] Мильвидский М.Г. Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.
- [2] В.С. Бердников, К.А. Митин Влияние режимов теплоотдачи на поля температуры и термических напряжений в монокристаллах // Известия РАН. Серия Физическая, 1, 2016, с. 75–80.
- [3] Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В. Влияние нестационарных режимов свободной и смешанной конвекции расплавов на теплообмен и формы фронтов кристаллизации в методе Чохральского // Известия РАН. Серия Физическая, 10, 2017, с. 1395 – 1402
- [4] Бердников В.С., Митин К.А., Григорьева А.М., Клещенок М.С. Зависимость полей температуры в кристаллах от их теплофизических параметров и свойств окружающей среды в методе Чохральского при различных режимах теплообмена // Известия РАН. Серия Физическая, 9, 2017, с. 1198 – 1204.
- [5] Бердников В.С., Кислицын С.А., Митин К.А. Численное моделирование процессов роста кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации из расплавов с различными числами Прандтля // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2017. Т. 81, № 10. - С. 1389–1394.
- [6] Митин К.А., Бердников В.С., Кислицын С.А. Зависимость формы фронта кристаллизации от режима теплообмена в методе бриджмена-стокбаргера // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12. – №1. – С. 106-116.
- [7] Митин К.А., Бердников В.С. Влияние режимов теплоотдачи на поле температуры в кристаллах в методе Чохральского // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86. № 7. – С. 989-996.

СИЛОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПАРЕ НЕЛИНЕЙНО НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kam@icmm.ru

Взаимодействие частиц наполнителя между собой, а также с матрицей, возникающее во внешнем магнитном поле, является основой магнитомеханики магнитоактивных эластомеров (МАЭ). Действующие между частицами магнитостатические силы, стремятся перестроить внутреннюю структуру композита, формируя и перемещая различные агрегаты из двух, трёх и большего числа частиц. Это, в свою очередь, вызывает изменение макроскопической реологии материала: модуля упругости, коэффициента внутреннего трения и пр.

Задача определения межчастичных сил является одной из ключевых при изучении магнитомеханики МАЭ. Примечательно, что уже на системе из двух частиц удаётся продемонстрировать многие важные эффекты, присущие реальным материалам, при том, что реальная числовая концентрация частиц составляет много порядков. В настоящей работе рассмотрен вопрос о том, как изменяются параметры магнитостатического взаимодействия намагничивающихся частиц при повороте приложенного поля относительно межцентрового вектора пары. Тем самым, мы расширяем рамки модели [1,2], где безальтернативно предполагалась строгая параллельность указанных направлений.

Описанная выше задача магнитостатики для пары сферических нелинейно намагничивающихся частиц, помещённых в однородное магнитное поле, с помощью итерационного алгоритма сводилась к последовательности линейных задач, которые в свою очередь, решались методом конечных элементов. Полученные данные об энергии интерполировались сплайнами в широком диапазоне характеризующих задачу параметров.

Полученные результаты подтверждают вывод о том, что в МАЭ преимущественным взаимодействием в парах является притяжение. По сравнению с предыдущими работами значительно уточнён вклад тангенциальной компоненты сил магнитного взаимодействия. Вторым этапом работы должна стать задача об изменении конфигурации пары частиц, расположенной под углом к приложенному полю и погруженной в упругую матрицу. В этом случае требуется совместное решение уравнений магнитостатики и теории упругости. Целью второго этапа будет аналитическая формула, способная описать зависимость энергии частиц от трёх параметров: расстояния между их центрами, внешнего поля и угла поворота относительно этого поля. На необходимость такого соотношения указывает также и продемонстрированное снижение предсказательных возможностей иных моделей, описывающих взаимодействие частиц.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № АААА-А20-120020690030-5.

Литература

- [1] Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers // Journal of Applied Physics. – 2014. – V. 116. – Art.no. 114904;
- [2] Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Mesoscopic magnetomechanical hysteresis in a magnetorheological elastomer // Physical Review E. – 2015. – V. 92., No. 2. – Art. no. 023202.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕТЧАТОЙ ПЛАСТИНКИ СКЛЕРЫ ГЛАЗА С УЧЕТОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ВНУТРИГЛАЗНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Богачев И.В., Недин Р.Д.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
bogachev89@yandex.ru

Одной из наиболее распространенных проблем в современной офтальмологии является диагностика глаукомы – хронического заболевания, при котором происходит атрофия волокон зрительного нерва, проходящих сквозь отверстия решетчатой пластинки склеры глаза (РПСГ), и последующее развитие оптической нейропатии. Распространенной причиной возникновения глаукомы является сдавливание нервных волокон в результате деформирования РПСГ, возникающего из-за повышенного внутриглазного давления [1]. Решетчатая пластинка находится на задней части склеры, представляет собой слоистую структуру круглой формы, ослабленную множеством отверстий, занимающих более 2/3 ее площади. Ближе к центру пластинка становится более разреженной, размер отверстий увеличивается. РПСГ испытывает механические нагрузки и деформации вследствие перепадов внутричерепного и внутриглазного давления, что влечет за собой наличие в ней предварительного напряженно-деформированного состояния.

В настоящей работе для моделирования РПСГ предложена модель упругой неоднородной пластины в рамках гипотез деформирования Тимошенко-Миндлина, позволяющая учесть в явном виде ее геометрические особенности (на основе опубликованных в литературе снимков), неоднородность материальных характеристик и наличие предварительных напряжений (ПН). Рассмотрены различные виды граничных условий: жесткая заделка и упругое опирание. Для расчета полей ПН решены вспомогательные задачи статики о прогибе решетчатой пластины под действием распределенной нагрузки, моделирующей внутриглазное давление; затем на основе найденного решения рассчитаны интегральные характеристики для компонент ПН. Вспомогательные задачи, как и основная задача расчета колебаний РПСГ с ПН были решены численно с помощью метода конечных элементов в пакете FreeFEM++. Проведен анализ влияния параметров предварительного напряженного состояния решетчатой пластины на ее деформационные и динамические характеристики (поля планарных и изгибных перемещений, углы поворота нормали вдоль осей в плоскости пластины, резонансные частоты, амплитудно-частотные характеристики). Также проведен анализ влияния уровня ПН на координаты точки перегиба РПСГ, характеризующей смену участков выпуклости/вогнутости, местоположение которой может использоваться в практической диагностике глаукомы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-71-10045, <https://rscf.ru/project/18-71-10045/> в Южном федеральном университете.

Литература

[1] Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения – М.: Реал Тайм, 2015. –208 с.

АНАЛИЗ ГРАНИЦЫ РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ

Бондаренко А.А., Ельтищев В.А., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

bondarenko.a@icmm.ru, kiv@icmm.ru

В работе изучается методика бесконтактного способа определения границы электропроводной среды. Интерес к данной теме обусловлен необходимостью контролировать уровень расплавленного металла, который содержится в тигле. Особенно остро эта проблема возникает в том случае, если металл является химически активным или находится при высокой температуре. Перемещение границы расплавленного металла в ходе гидродинамических процессов еще более усложняет данную задачу. В данном случае все методики, основанные на контактных датчиках уровня, практически невозможно использовать. Наиболее удобным в данном случае является применение бесконтактных датчиков уровня [1,2], основанных на явлении электромагнитной индукции, поэтому датчики называются индукционными. В работе [1] описана разработка такого датчика и его математическое моделирование, а в работе [2] показания датчика успешно сравниваются с измерениями уровня с помощью ультразвукового доплеровского анемометра. Однако методика расчета, применяемая в работе [1], основанная на анализе мнимой части магнитного поля, требует дальнейшего совершенствования, что и является причиной выполнения данного исследования.

Рассматривается соленоид, по которому течет переменный ток, что приводит к генерации переменного магнитного поля. При этом величина напряжения будет существенно зависеть от электрических и магнитных свойств сред, размещенных в области соленоида. Если вблизи находится ферромагнитное тело, то оно намагнитится, а если тело электрически проводящее, то в нем возникнут вихревые токи. Все это приводит к изменению индуктивного сопротивления соленоида, что можно зафиксировать путем измерения напряжения. Это дает возможность реализовать методику бесконтактного контроля электрически проводящих сред. Численное моделирование электродинамических процессов проводится в пакете Ansys Emag. В отличие от работы [1], в данном исследовании используется другой способ численного определения отклика среды на исходное переменное магнитное поле. Используются конечные элементы, которые имитируют источник питания. Тестирование методики проводится на индукторе, аналогичном использованному в работе [3], по которому накоплен большой опыт исследований. На данном этапе по исследованию датчика, определены зависимости сигнала соленоида от электропроводности среды и от частоты его питания. Результаты расчетов сопоставляются с результатами экспериментов, проведенных с помощью аналогичного датчика. Результаты предполагается использовать для контроля уровня расплавленной электропроводной среды.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Eltishchev V., Mandrykin S., Kolesnichenko I. Induction level sensor: experiment and calculation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 950. – P. 012014.
- [2] Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I. Oscillations of free surface of rotating liquid metal in cylindrical cell // Magnetohydrodynamics. – 2021. – V. 57. – P. 41-50.
- [3] Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S. Vortical flow of conducting fluid driven by an alternating magnetic field in a plane channel // Magnetohydrodynamics. – 2007. – V. 43. – P. 45-52.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ЖИДКОСТЬЮ

Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
bochkarev@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru*

Цилиндрические оболочки нередко являются важными элементами сложных изделий, используемых в авиационной и аэрокосмической промышленности. Широкие возможности в области формирования требуемых динамических характеристик такого рода конструкций открываются за счёт использования слоистых композиционных материалов. Подбирая схему армирования и укладки, можно добиться их безопасного функционирования в необходимом спектре частот при ограниченных габаритах и массе. Представленные в литературе исследования по данному направлению ограничены, традиционно, круговыми цилиндрическими оболочками. Известно, что отклонение их поперечного сечения от кругового профиля сильно влияет на динамическое поведение системы [1–4]. Данная особенность позволяет на этапе проектирования внести незначительные изменения в исходную геометрию конструкции и повысить её эксплуатационные характеристики.

С использованием модификации разработанного ранее конечно-элементного алгоритма [3, 4] проведена серия расчётов. Их целью являлся анализ влияния параметра эллиптичности поперечного сечения на собственные частоты колебаний цилиндрической оболочки, содержащей жидкость и изготовленной из слоистого композиционного материала. Показано, что с уменьшением отношения полуосей эллипса собственные частоты колебаний оболочки падают. Это объясняется тем, что часть конструкции с большим радиусом кривизны имеет меньшую жёсткость. Она работает на изгиб подобно пологой оболочке или пластине. Полученные зависимости носят немонотонный характер, поэтому при подборе параметров и схемы укладки композиционного материала, обеспечивающих требуемые динамические характеристики, используются методы глобальной оптимизации. По результатам вычислений построены зависимости относительного изменения собственных частот колебаний как функции от угла намотки и отношения полуосей эллипса. Оценено влияние кинематических граничных условий, задаваемых на краях оболочки. Продемонстрирована возможность управления спектром собственных частот колебаний конструкции путём подбора угла намотки слоёв композиционного материала. Показано, что эффективность данного механизма управления снижается с увеличением длины оболочки.

Литература

- [1] Sewall J.L., Pusey C.G. Vibration study of clamped-free elliptical cylindrical shells // *AIAA Journal*. – 1971. – V. 9, No. 6. – P. 1004–1011.
- [2] Бойко Д.В., Железнов Л.П., Кабанов В.В. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости подкреплённых эллиптических цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении изгибающим моментом и краевой поперечной силой // *Известия РАН. Механика твёрдого тела*. – 2011. – № 5. – С. 130–136.
- [3] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P. Natural vibrations of loaded noncircular cylindrical shells containing a quiescent fluid // *Thin-Walled Structures*. – 2015. – V. 90. – P. 12–22.
- [4] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P. Natural vibrations and stability of elliptical cylindrical shells containing fluid // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. – 2016. – V. 16, No. 10. – 1550076.

УСТОЙЧИВОСТЬ АКТИВНОЙ СРЕДЫ НАСЫЩЕННОЙ МИКРОРОБОТАМИ

Брацун Д.А., Ступникова А.В., Костарев К.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
DABracun@pstu.ru, stypnast2014@yandex.ru, KVKostarev@pstu.ru

В последние годы внимание исследователей привлекает активная жидкость, под которой понимается вязкая суспензия макромолекул, клеток или бактерий, способных самостоятельно перемещаться и создавать микроскопические напряжения в жидкости [1]. Известно, что усилия активных элементов могут приводить к таким макроскопическим явлениям в жидкости, как биоконвекция или спонтанный переход в сверхтекучее состояние. В недавних работах была доказана технологическая возможность создания более сложной среды, которая включает множество подвижных устройств, способных к коммуникации между собой [2]. Мы предлагаем новый термин для такой среды – *роботизированная жидкость* – и считаем, что она должна стать предметом изучения гидродинамиков.

Данная работа посвящена исследованию устойчивости жидкости, насыщенной роем искусственных элементов (это могут быть микророботы или микрокиборги, пример экспериментальной реализации последних представлен в [2]), которые способны перемещаться в среде согласно некоторому предписанному алгоритму. Например, мы рассматриваем возможность движения активных элементов по градиенту температуры. Так как плотность каждого элемента роя больше, чем плотность жидкости, то суммарная плотность среды непрерывно меняется по пространству и времени. Поведение роя исследуется на примере простейшей конвективной системы: замкнутый канал, поперечное сечение которого много меньше характерного размера всей системы петли [3]. Конвективная петля заполняется несжимаемой жидкостью, неоднородно нагревается и помещается во внешнее силовое поле. Была рассмотрена петля тороидальной формы. Сплошносредний подход к изучению устойчивости среды был основан на усредненных уравнениях одномерного течения жидкости, которые были модифицированы с учетом объемной силы, которую оказывает рой микророботов на элемент жидкости. Была также построена гибридно-дискретная модель, в рамках которой среда рассматривалась как сложная система локально взаимодействующих между собой и жидкостью микроскопических элементов с индивидуальной динамикой. Гибридность обусловлена тем, что расчет поведения роя синхронизируется с расчетом сплошных полей скорости жидкости и температуры.

Показано, что рой микропловцов может успешно поддерживать устойчивость неоднородно нагретой роботизированной жидкости даже при надкритических значениях числа Рэлея. Так как скорость движения микророботов в жидкости ограничена их конструкцией, определяющим параметром конвективной системы, который влияет на её устойчивость, является характерный размер этой системы. Определен критический размер петли, зависящий от скорости движения микропловцов, при котором перестроения роя не успевают вносить необходимые изменения в состояние системы и её стабилизация уже невозможна.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (№ FSNM-2020-0026).

Литература

- [1] Saintillan D. Rheology of Active Fluids // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2018. – Vol. 50. – P. 563-592.
- [2] Leaman E. J., Geuther B. Q., Behkam B. Hybrid centralized/decentralized control of a network of bacteria-based bio-hybrid microrobots // J. Micro-Bio Robot. – 2019. – V. 15(1). – P. 1-12.
- [3] Bratsun D., Krasnyakov I., Zyuzgin A. Delay-induced oscillations in a thermal convection loop under negative feedback control with noise // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 2017. – V.47. – P. 109-126.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КИНЕТИКУ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ МЕДИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Брюханов И.А.

НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

[*ibryukhanov@gmail.com*](mailto:ibryukhanov@gmail.com)

Работа посвящена исследованию процессов пластической деформации и разрушения кристаллов меди при ударном сжатии. Проведены молекулярно-динамические расчеты для идеальных кристаллов и кристаллов с имеющимися дислокациями ориентации [110] и [111] в широком диапазоне температур 100-1100 К и скоростей ударов. Изучена эволюция структуры ударной волны в рассматриваемых системах. Показано, что в идеальных кристаллах при достаточно низких температурах и скоростях удара формируется упругий предвестник с постоянным значением параметров. При более высоких температурах для установления структуры волны требуется больше времени из-за процессов зарождения дислокаций в зоне между упругой и пластической волнами, которые приводят к локальной релаксации напряжений. В кристалле с дислокациями упругий предвестник формируется в результате размножения дислокаций, и затухает значительно быстрее, чем в идеальных кристаллах. Установлено, что величина упругого предвестника в кристалле [110] с дислокациями увеличивается с температурой при одной и той же скорости удара, в то время как для чистого кристалла она снижается с температурой в широком диапазоне температур. В кристаллах [111], имеющими идеальную структуру и с предварительно созданными дислокациями, напряжение на упругом предвестнике увеличивается с температурой в умеренном диапазоне температур до 900 К.

Проведены расчеты ударно-волнового нагружения кристаллов меди ориентаций [100], [110], [111], [102], [112], [221], [134] и [401]. Скорость удара в этих расчетах по образцу изменялась в диапазоне от 300 до 900 м/с, а длительность импульса составляла 20 пикосекунд. В результате расчетов исследовалась структура ударной волны, формирование упругого предвестника и его затухание, а также величина откольной прочности. Показано, что скорость затухания упругого предвестника зависит от ориентации кристалла. Показано, что для направления [100] наблюдается самая слабая степень затухания, что согласуется с теорией Джонсона. Показано, что для всех ориентаций кристаллов, кроме [100], наличие дислокаций замедляет процесс откола. При этом для кристалла [110] было обнаружено, что поры зарождается не гомогенно области растягивающих напряжений, а гетерогенно - в узлах пересечения дислокаций в структуре дислокационных ячеек, сформированной за фронтом ударной волны. Для кристалла [100] был обнаружен противоположный эффект – дислокации облегчают зарождение пор, являясь концентраторами напряжений для их образования. Так, при ударе в 500 м/с в идеальном кристалле откола не происходит, тогда как в кристалле с дислокациями при той же скорости удара наблюдается зарождение и рост пор.

Результаты работы показывают значительную анизотропию механизмов пластической деформации и откольного разрушения в кристаллах меди при ударном сжатии.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов МСЦ РАН. Исследование влияние температуры и дислокаций на структуру ударной волны в кристаллах меди выполнено при поддержке гранта РНФ 22-71-00088. Исследование механизмов откольной прочности в кристаллах меди различных ориентаций выполнено при поддержке гранта Президента РФ №МК-2948.2022.1.1.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ГРУНТОВ

Бублик С.А., Семин М.А.

Горный институт УрО РАН, Пермь
serega-bublik@mail.ru, seminma@inbox.ru

Математическое моделирование тепло- и массопереноса при искусственном замораживании грунтов является обязательным этапом при мониторинге формирования ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг строящегося подземного сооружения. ЛПО возводится с целью недопущения затопления подземного сооружения грунтовыми водами и укрепления незакрепленных стенок сооружения до возведения постоянной крепи [1, 2].

Проведение качественного и приближенного к реальности математического моделирования невозможно без экспериментальной базы, которая позволит параметризовать модель. В связи с этим первая часть работы посвящена описанию обработки экспериментальных замеров теплофизических свойств грунтов, содержащих различные соли. Присутствие растворенных солей в подземных водах водоносных горизонтов вблизи контакта с водоупорным слоем каменной соли является распространенной проблемой при строительстве стволов калийных рудников. Это связано с уменьшением температуры начала замерзания поровой воды, содержащей соли. В число рассмотренных в работе параметров входят: фазовый состав, теплоемкость и теплопроводность грунтов. Данные параметры рассматриваются относительно их зависимости от температуры. Полученные экспериментальные замеры математически обрабатывались с целью получения аналитических зависимостей теплофизических параметров грунтов от температуры.

Вторая часть работы посвящена описанию математической модели и анализу результатов моделирования тепло- и массопереноса в грунтах с использованием полученных аналитических зависимостей теплофизических параметров. Модель геометрически рассматривалась в одномерной постановке относительно строящегося вертикального шахтного ствола. Явно учитывался теплообмен грунтов с замораживающей колонкой. Массоперенос рассматривался относительно фильтрации подземных вод. Распределение температуры в породном массиве определялось из решения уравнения конвекции-диффузии в энтальпийной постановке с соответствующими начальными и граничными условиями. Распределение грунтовых вод определялось из решения уравнения Дарси. Уравнения рассматривались в нестационарной постановке и решались численно методом конечных разностей по явной схеме Эйлера.

В качестве основного результата рассматривались получаемые поля температуры в различные моменты времени с целью определения влияния минерализации грунта и фильтрации подземных вод на гидроизоляционные характеристики и прочность ЛПО.

Литература

- [1] Вакуленко И.С., Николаев П.В. Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 3. – С. 338-346.
- [2] Амосов П.В., Лукичев С.В., Наговицын О.В. Влияние пористости породного массива и температуры хладонносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – №. 4 (27). – С. 43-50.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДНК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЯХ

Бурмистрова О.С.¹, Никитюк А.С.¹, Баяндин Ю.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь

ozernykh.o@icmm.ru, nas@icmm.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

На сегодняшний день определение физических механизмов инициации и развития метаболизма, транскрипции и репликации ДНК является актуальной задачей эпигенетики [1]. В работе исследуется статистическая термодинамическая модель ДНК с открытыми состояниями.

В рамках работы рассматриваются внутренние переменные, связанные с открытыми состояниями ДНК, для определения взаимодействия внутри пар нуклеотидов. Исследуются возможные формы свободной энергии, которая соответствует «эффективной температуре». Изучена нелинейная динамика ДНК на основе сопоставления результатов моделирования статистико-термодинамической и Пейрара-Бишопа-Доксуа моделей, подтвердившая адекватность изучаемой модели. По результатам моделирования установлена «критическая» динамика в характерных диапазонах структурно-скейлингового параметра как формы коллективных мод открытых состояний, обеспечивающих функциональность динамики ДНК.

В качестве дальнейших перспектив исследования планируется идентификация и верификации кинетических параметров на основе экспериментальной и теоретической постановки задачи моделирования, изучение поведения ДНК в зависимости от нелокальных эффектов и описание функциональных процессов ДНК, в частности, транскрипции, репликации, экспрессии генов и т.д.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт № АААА-А19-119013090021-5), а также поддержана Грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (№ МК-44.2022.1.1).

Литература

[1] R. Cortini, M. Barbi, B. R. Car' e, C. Lavelle, A. Lesne, J. Mozziconacci, J.-M. Victor The physics of epigenetics // Reviews of Modern Physics, №88(2). -2016. – 025002 p.

ДИНАМИКА СВОБОДНОПЛАВАЮЩЕГО ТЕЛА В УСЛОВИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Фрик П.Г., Сухановский А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

vasiliev.a@icmm.ru

Экспериментально исследовано влияние радиационного нагрева нижней поверхности на динамику свободноплавающего тела. Экспериментальная модель представляет собой прямоугольную полость длиной 500 мм, шириной 100 мм и высотой 180 мм. Основание модели изготовлено из стеклотекстолита толщиной 10 мм и выступает в качестве нагревателя. Для поглощения электромагнитного излучения поверхность основания, которая контактирует с водой, покрашена в черный матовый цвет. В основании имеются девять отверстий, в которые устанавливаются термопары. Нагрев нижней поверхности осуществляется при помощи света от светодиодной панели. Использование светодиодов, а не ламп накаливания, в качестве источника света обусловлено спектром излучения. В спектре обычной лампы накаливания присутствует сильное инфракрасное излучение. Поскольку в качестве рабочей жидкости используется вода, верхние слои будут поглощать инфракрасное излучение, что приведет к постепенному прогреву жидкости. Инфракрасная составляющая в спектре диодов практически отсутствует. В экспериментах верхняя граница свободная. Все эксперименты были выполнены для фиксированного числа Релея $Ra=10^6$ и числа Прандтля $Pr=6.5$.

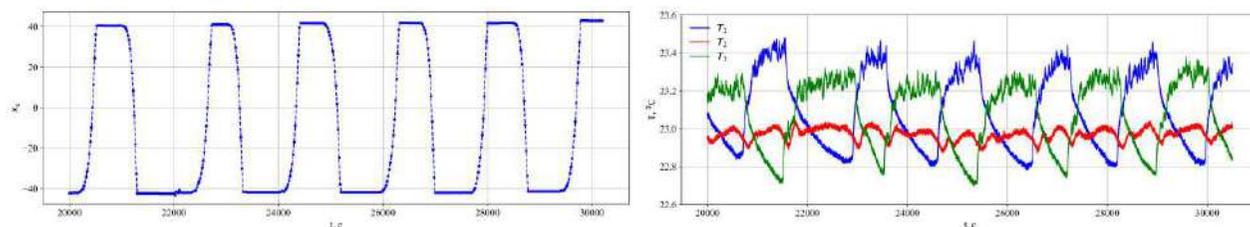


Рис.1 Временная эволюция координаты центра диска (*a*) и температуры на нижней поверхности (*b*).

Свободно плавающее тело представляет собой плексигласовый диск толщиной 1 мм и диаметром 98 мм. В экспериментах использовались два диска одинакового размера, но с разными свойствами поверхности. Поверхность одного диска покрашена в черный матовый цвет для поглощения излучения, а на поверхность другого диска наклеена тонкая пищевая фольга, которая служит для отражения света. Движение диска регистрируется на видеокамеру. Высота слоя жидкости была фиксирована, а длина полости и положение плавающего тела варьировались. Эксперименты показали, что характер движения тела зависит от свойств поверхности свободноплавающего тела. Во всех экспериментах со светоотражающим диском наблюдались квазипериодические движения плавающего диска (см. Рис.1), причем период колебаний зависит как от длины полости, так и от положения тела. В отличие от фиксированных граничных условий [1] при увеличении длины полости не наблюдается переход к хаотическому режиму движения диска. В случае, когда поверхность диска поглощает электромагнитное излучение, диск перемещается к одной из боковых стенок и длительное время не меняет своего положения.

Работа выполнена за счет проекта РФФ № 22-61-00098.

Литература

[1] Попова Е.Н., Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Динамика протяженного теплоизолятора, погруженного в подогреваемый снизу слой жидкости // Вестник Пермского ун-та. Физика. 2022. №3. С.38-47.

МАЛОМОДОВАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СЛУЧАЕ СВОБОДНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ

Васильев А.Ю., Степанов Р.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

vasiliev.a@icmm.ru, rodion@icmm.ru

Работа направлена на исследование крупномасштабной циркуляции (КМЦ) турбулентного конвективного течения в случае свободной верхней границы. КМЦ характеризуется сложной временной динамикой и существенно влияет на процессы теплопереноса. Большое количество исследований посвящено анализу КМЦ в цилиндрических полостях, в которых детально описаны особенности формирования и различного рода смены направления вращения КМЦ. Существенно меньше работ посвящено особенностям турбулентной крупномасштабной циркуляции в кубических полостях. В данной работе впервые рассматривается турбулентное конвективное течение в прямоугольной области с аспектным отношением 2:1:1 при числе Релея $Ra=1.2 \cdot 10^8$ и Прандтля $Pr=6.1$ в условиях, когда нижняя граница однородно нагревается, а верхняя является свободной, что обеспечивает квазистационарный отток тепла. Боковые границы теплоизолированы. Цель работы состоит в построении математической маломодовой модели, которая бы описывала пространственно-временные свойства КМЦ.

Разрабатываемая модель основана на проведении собственного ортогонального разложения результатов численного моделирования в пакете OpenFOAM. Расчеты выполнялись в постановке задачи, приближенной к проведенным экспериментам. Было показано соответствие численных и экспериментальных результатов, на основе которых можно восстановить временную эволюцию вектора углового момента КМЦ (см. Рис.1(a)). Вычисленные проекции углового момента L_x и L_y демонстрируют периодические колебания (см. Рис.1(b)) относительно нулевого среднего значения.

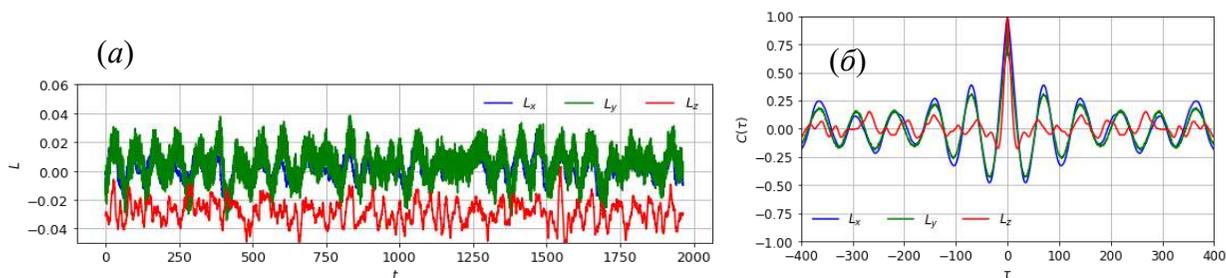


Рис.1 Временная эволюция компонент углового момента (a) и автокорреляционная функция компонент углового момента (b)

Используя подход Галеркина для проекции системы уравнений термогравитационной конвекции на базис пространственных мод, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений. На данном этапе исследования сформулирована маломодовая модель, включающая только первые четыре наиболее энергосодержащие моды и способная воспроизвести наблюдаемые колебания КМЦ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20067).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОМ ДЕФОРМИРУЕМОМ МИОКАРДЕ

Вассерман И.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

igorw@icmm.ru

Одним из опасных нарушений деятельности сердца является возникновение самовоспроизводящихся волновых процессов, не приводящих к сокращению сердца, как целого органа.

С макроскопической точки зрения сердечная мышца может рассматриваться как две взаимопроникающие неоднородные анизотропные проводящие среды – внеклеточное пространство и внутриклеточное пространство, взаимодействующие через мембрану [8,9]. Каждая из этих двух сред характеризуется своим тензором проводимости. Построенная на этих предположениях модель электрической активности сердца называется бидоменной. Если предположить, что тензоры проводимости внутриклеточного и внеклеточного пространства подобны, то модель сердечной мышцы может быть значительно упрощена. (монодоменная). Её достаточно для большинства задач о распространении волн возбуждения в ткани миокарда. Однако бидоменная модель необходима в тех случаях, когда принимается во внимание сам процесс возбуждения от внешних факторов.

Рассмотрено возникновение автоколебательных процессов в результате действия дополнительных источников электрического возбуждения, и резко очерченных областей с отличающейся проводимостью или длительностью потенциала действия. Рассмотрено возникновение областей де- и гиперполяризации в волокнистой структуре, характерной для вершины сердца и появление зародышей спиральных волн на дефектах волокнистой структуры типа складки.

Электрическая стимуляция приводит к сокращению сердечной мышцы. Процесс сокращения миокарда в свою очередь, оказывает значительное воздействие на процесс электрического возбуждения (механо-электрическая обратная связь). Это влияние заключается как в изменении проводимости миокарда, так и в возникновении дополнительных трансмембранных токов. Влияние деформации на процесс распространения возбуждений оказывается сравнительно слабым. Гораздо большим оказывается влияние деформации на процесс возбуждения от внешних факторов, где внутриклеточная и внеклеточная среда играют более самостоятельные роли.

Миокард имеет сложную неоднородную волокнисто-слоистую структуру и обладает ортотропными электрическими и механическими свойствами. Физиологическое возбуждение желудочков сердца происходит посредством проводящей системы, скорость распространения импульса в которой на порядок превосходит таковую в миокарде. Электрическое взаимодействие клеток проводящей системы и желудочков происходит на эндокарде. Взаимодействие сети Пуркинье с миокардом демонстрируется на тестовой задаче с помощью приложения локализованных с помощью в пространстве и времени объемных источников тока. Моделировалась блокада ножек пучка Гиса на Y-образной структуре. Могут реализовываться три режима возбуждения ножек Гиса: возбуждение проходит через разветвление, возбуждение не проходит, возбуждение проходит, но с задержкой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта N 19-41-590002 p_a

УПРАВЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ И КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ СТРУИ

Веденеев В.В., Никитин Н.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
vasily@vedeneev.ru, nvnikitin@mail.ru

Обычно считается, что неустойчивость в струйных течениях несжимаемой жидкости имеет конвективный характер. Однако в последнее время было продемонстрировано несколько типов однонаправленных (без противотока) абсолютно неустойчивых профилей скорости невязких круглых струй [1-3], которые также предполагают возможность абсолютно неустойчивых плоских течений.

В работе рассматриваются двумерные плоские струи вязкой несжимаемой жидкости. Исследуется двухпараметрическое семейство гладких профилей скорости, в которых один параметр управляет скоростью в точке перегиба, другой — градиентом скорости. Характер неустойчивости исследуется с использованием критерия Бриггса [4, 5] — изучением положения седловой точки функции $\omega(\alpha)$ в комплексной плоскости. Обратная функция $\alpha(\omega)$ вычислялась численно путём решения задачи на собственные значения для уравнения Орра-Зоммерфельда. Показано, что, как и для круглых струй, неустойчивость становится абсолютной в невязком пределе ($Re \rightarrow \infty$), когда в точке перегиба либо скорость мала, либо ее градиент велик. Для течений, абсолютно неустойчивых в невязком пределе, определены критические значения числа Рейнольдса, соответствующие переключению между абсолютной и конвективной неустойчивостью.

Для независимой проверки анализа седловой точки проведено прямое численное моделирование роста локализованного возмущения в рамках линеаризованных уравнений Навье-Стокса. Определяется скорость роста возмущения в фиксированной точке пространства. Показано, что задний фронт возмущения движется вниз по потоку для докритического и вверх по потоку — для сверхкритического Re , тем самым подтверждая результаты анализа седловой точки.

Работа поддержана грантом РФФ 20-19-00404.

Литература

- [1] Lesshafft L., Marquet, O. Optimal velocity and density profiles for the onset of absolute instability in jets // J. Fluid Mech. 2010. V. 662. P. 398–408.
- [2] Balestra G., Gloor M., Kleiser L. Absolute and convective instabilities of heated coaxial jet flow // Phys. Fluids. 2015. V. 27. 054101.
- [3] Vedeneev V., Zayko J. On absolute instability of free jets // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1129. 012037.
- [4] Briggs R. J. Electron-Stream Interaction with Plasmas. 1964. MIT Press.
- [5] Bers A. Space-time evolution of plasma instabilities — absolute and convective. In Hand-book of Plasma Physics. 1983. Chap. 3.2. P. 451–517. North-Holland.

ГЕОСТРОФИЧЕСКИЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Вергелес С.С.^{1,2}, Парфеньев В.М.^{1,2}, Филатов С.В.^{1,3}, Тумачёв Д.Д.³

¹Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черногловка, МО

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва

³Институт физики твёрдого тела РАН, Черногловка, МО

ssver@itp.ac.ru

Нами проведено разностороннее теоретическое исследование когерентных геострофических вихрей [1-5], возникающих при определённых условиях в турбулентном течении быстро вращающейся как целое жидкости, а также проведены первые эксперименты по наблюдению и исследованию свойств таких вихрей.

Геострофические когерентные вихри – это вихревые структуры, статистически устойчивые во времени. Вследствие действия силы Кориолиса они статистически однородны вдоль оси вращения, т.е. их ось параллельна оси вращения всей жидкости как целого. Тело вихрей аксиально-симметрично. Долговременное существование когерентных вихрей поддерживается мелкомасштабной турбулентностью, которая формирует напряжение Рейнольдса. Это напряжение Рейнольдса имеет знак, соответствующий отрицательной турбулентной вязкости, и амплитуду, достаточную для компенсации действия вязких сил, включающих в себя объёмную вязкость [1] и трение о границы области течения [3]. При достаточно большой интенсивности течения появляется асимметрия между циклонами и антициклонами [2]. Нами найдены радиальные профили азимутальной скорости в вихрях в различных постановках задачи [1-3]. Мы изучили статистику мелкомасштабных турбулентных пульсаций [5] и аксиально-симметричных крупномасштабных возмущений [4] на фоне статистически стационарного вихревого течения.

Экспериментальное изучение геострофических когерентных течений производилось в герметичном кубометре воды, вращающемся с угловой скоростью в диапазоне 0.1-0.7 Гц. Возбуждение течения производилось лопатками, прикреплёнными к вертикально расположенным осям. Четыре таких оси, вращающихся с характерной угловой скоростью 2Гц, были расположены в четырёх углах куба. Движение лопаток возбуждает зародыши геострофических вихрей, а также инерционных волны, которые, распространяясь в объём, и создают напряжение Рейнольдса, поддерживающее когерентные вихри в объёме. Для относительно низких частот вращения куба мощность возбуждения течения лопатками оказалась достаточной для того, чтобы когерентные вихри оказались крупномасштабными. Радиальный профиль скорости в них имеет широкий плоский участок, что согласуется с построенной нами теорией.

Литература

- [1] Kolokolov I.V., Ogorodnikov L.L., Vergeles S.S. Structure of coherent columnar vortices in three-dimensional rotating turbulent flow // *Physical Review Fluids*. – 2020. – V. **5**(3). – P. 034604.
- [2] Parfenyev V.M., Vointsev I.A., Skoba A.O., Vergeles S.S. Velocity profiles of cyclones and anticyclones in a rotating turbulent flow // *Physics of Fluids*. – 2021. – V. **33**(6). – P. 065117.
- [3] Parfenyev V.M., Vergeles S.S. Influence of Ekman friction on the velocity profile of a coherent vortex in a three-dimensional rotating turbulent flow // *Physics of Fluids*. – 2021. – V. **33**(11). – P. 115128.
- [4] Ivchenko N.A., Vergeles S.S. Waves in a coherent two-dimensional flow // *Physics of Fluids*. – 2021. – V. **33**(10). – P. 105102.
- [5] Ogorodnikov L.L., Vergeles S.S. Structure function of velocity in a geostrophic vortex under strong rotation // *Physics of Fluids*. – 2022. – V. **34**. – P. 125111.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛ С УЧЕТОМ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Вильдеман В.Э., Кочнева Я.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
wildemann@pstu.ru, yaroslavaviktorovna@gmail.com

Экспериментально подтверждено, что сопротивление разрушению определяется не только прочностными постоянными материала, но и зависит от жесткости нагружающей системы [1]. В работе [2] получены численные решения для задач деформирования тонкой пластины с концентраторами напряжений различной геометрии при кинематическом нагружении. Проанализирована эволюция зон закритического деформирования в материале.

В работа рассматривается проблема моделирования процессов деформирования и разрушения тел с концентраторами напряжений. Вопросы, связанные с данной темой, являются актуальными, поскольку позволяют решать проблемы обеспечения надежности, живучести и безопасности используемых конструкций [1, 3-4].

Целью работы является выявление закономерностей неупругого деформирования твердых тел на основе получения и анализа численного решения краевых задач механики закритического деформирования.

Рассмотрена упругопластическая модель с линейным разупрочнением, проанализировано, каким образом при изменении значения модуля разупрочнения меняется конфигурация пластической зоны и диаграммы нагружения.

Произведена оценка влияния жесткости нагружающей системы на процесс деформирования пластины. Оценка производится путем изменения геометрии пластины и граничных условий.

Рассмотрена упругопластическая модель с модулем упрочнения и варьированием модуля разупрочнения. Проанализирована связь модуля разупрочнения и конфигурации пластической зоны, диаграммы нагружения.

Получены численные решения в упругопластической постановке для идеального упругопластического материала, рассмотрены условия смены между механизмами. Проанализирована связь конфигурации пластической зоны со значениями модуля разупрочнения. Рассмотрено влияние модуля упрочнения на конфигурацию пластической зоны и на значение максимальной нагрузки, выдерживаемой телом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-19-00765.

Литература

- [1] Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. — 156 с. ISBN 978-5-398-02104-2.
- [2] Вильдеман В.Э., М.П. Третьяков, А.И. Мугатаров. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика — 2020. — №3. — С. 32-40.
- [3] Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 120 с. — ISBN 978-5-9221-1719-7.
- [4] Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 204 с. — ISBN 978-5-9221-1374-8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТЕКЛОПЛАСТИКАХ ПРИ ДВУХОСНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Вильдеман В.Э., Кучуков А.М.¹, Лунегова Е.М., Мугатаров А.И., Староверов О.А.,
Струнгарь Е.М., Чеботарева Е.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

¹artur.kuchukov.59@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование процессов накопления повреждений в конструкционных стеклопластиках при одноосных и двухосных пропорциональных циклических воздействиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью учета деградации механических характеристик, возникающей вследствие накопления повреждений, при прочностном анализе конструкций.

Проведены статические испытания стеклопластиковых образцов в виде трубок, полученных методом непрерывной намотки, в условиях пропорционального растяжения с кручением. С применением бесконтактной оптической видеосистемы VIC-3D и метода корреляции цифровых изображений построены диаграммы деформирования материала. Путем анализа данных, полученных системой регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-6, выявлены основные дефекты, сопровождающие процесс разрушения. Проведен анализ изломов образцов с помощью стереомикроскопа CarlZeiss Discovery.V12.

Проведены одноосные и двухосные усталостные испытания аналогичных образцов. Оценка деградации упругих характеристик композита проведена по данным о снижении жесткости по мере роста числа циклов. Обработка проведена с использованием ранее разработанной авторами модели [1-3]. Отмечена стадийность процесса накопления повреждений. Продемонстрирована высокая описательная способность модели. Проведен анализ сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных во время усталостного испытания.

Сделан вывод о необходимости исследования процессов накопления повреждений в конструкционных стеклопластиках при многоосных циклических воздействиях и важности учета возникающих при этом деградации механических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-79-00136) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

- [1] Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э., Староверов О.А. Описание кривых усталостной чувствительности и перехода к критическим состояниям полимерных композитов интегральными функциями распределения вероятности // Сборник материалов XVI международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – 2022. – С. 65.
- [2] Мугатаров А.И., Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Усталостная чувствительность и критические состояния конструкционных композитов // Материалы XXXI Всероссийской школы-конференции "Математическое моделирование в естественных науках". – 2022. – С. 223–225.
- [3] O.A. Staroverov, A.I. Mugatarov, A.S. Yankin, V.E. Wildemann. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2023. – Vol. 17. – No. 63. – pp. 91–99.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА И ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

Виндокуров И.В.¹, Ташкинов М.А.¹, Зильбершмидт В.В.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

² Университет Лафборо, Лафборо

ivv@pstu.ru, M.Tashkinov@pstu.ru, V.Silberschmidt@lboro.ac.uk

В настоящее время происходит стремительное внедрение и развитие современных материалов и производственных технологий. По сравнению с устоявшимися технологиями, аддитивное производство позволяет автоматизировать процесс изготовления и обеспечивает большую гибкость для локального проектирования архитектуры цифровых моделей в трехмерном пространстве.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования механических свойств образцов из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК), изготовленных аддитивно методом послойной печати, с различными параметрами, а также подвергнутых последующей термической обработке. Стандартные и компактные образцы были изготовлены с различным углом заполнения, используя сопла диаметром 0,4 мм и 0,6 мм. Половина изготовленных образцов была подвергнута термической обработке при 220°C до полной кристаллизации. Испытания на растяжение были проведены для определения значений модуля упругости, предела прочности при растяжении, а также вязкости разрушения I моды и скорости высвобождения критической энергии деформации. Кроме того, были изучены свойства одиночного чистого и экструдированного филамента при растяжении. Был сделан вывод, что термообработка значительно улучшила упругие свойства, предел прочности при растяжении и вязкость разрушения образцов ПЕЕК: сопротивление разрушению увеличилось на 33-45% в зависимости от ориентации укладки, в то время как предел прочности при растяжении увеличился примерно на 45-65%, при этом модуль упругости вырос до 20%. Поля деформации, вызванные в образцах распространением трещин, были зафиксированы с помощью метода корреляции цифровых изображений и сопоставлены с результатами численного моделирования, реализованного с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM). Были сделаны выводы об оптимальных параметрах 3D-печати с использованием материала ПЕЕК [1].

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках гранта, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-578 от 31.05.2021 г.

Литература

- [1] I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, and V. V. Silberschmidt, "Effect of Heat Treatment on Elastic Properties and Fracture Toughness of Fused Filament Fabricated PEEK for Biomedical Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 24, p. 5521, Dec. 2022, doi: 10.3390/polym14245521.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС АРОЧНОЙ БЕТОННОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Витохин Е.Ю.

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург

vitokhineyu@vniig.ru

При анализе прочности бетонных плотин, расположенных в сейсмоопасных районах, важно принимать во внимание необходимость обеспечения прочности сооружения при действии сейсмических нагрузок. В соответствии с отечественными нормативами, расчет на сейсмостойкость бетонных плотин I и II классов необходимо проводить расчет с использованием динамической теории сейсмостойкости. В таком случае необходимо проводить расчет во временной области на действие акселерограммы. При выполнении таких расчетов большое влияние на результат оказывает способ задания акселерограммы, моделирование неотражающих граничных условий, а также учет взаимодействия сооружения с водой в водохранилище. В работе представлены результаты расчета арочной бетонной плотины на сейсмическое воздействие с использованием акселерограммы, пересчитанной на нижнюю границу расчетной области, что позволяет учесть движение берегов каньона. На боковых границах расчетной области основания используются неотражающие условия типа Free-field. Взаимодействие с водой в водохранилище моделируется двумя способами: с помощью акустических элементов и присоединенных масс жидкости, заданных по методике Вестергаарда [1].

Литература

[1] Westergaard H.M. Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. – 1931. – Vol. 57, No. 9. – P. 1303–1318.

ПОДВЕС ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ, СОВЕРШАЮЩЕЙ АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ НА ФОНЕ РАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ

Власова О.А.

Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет, Пермь
vlasova_oa@pspu.ru

Экспериментально исследуется осредненная подъемная сила, действующая на осциллирующее цилиндрическое тело в цилиндрической полости с жидкостью. Полость совершает модулированное вращение вокруг горизонтальной оси. Плотность тела больше плотности жидкости и под действием центробежной силы цилиндр в начальный момент времени прижат к стенке полости. В ходе модулированного вращения полости за счет вязкого взаимодействия со стенкой тело совершает азимутальные колебания вдоль границы полости и вращательные колебания вокруг своей оси. По достижении критического значения амплитуды азимутальных колебаний (при фиксированной частоте) тело отрывается от стенки полости. Цилиндр смещается в радиальном направлении на некоторое расстояние от стенки, продолжая совершать колебания. Изучение данного эффекта было проведено в ряде работ [1-2]. В более ранних экспериментах с телами, совершающими инерционные колебания в осциллирующей полости с жидкостью, было показано, что рост коэффициента подъемной силы наблюдается с области низких и умеренных безразмерных частот [3-4]. В высокочастотной области коэффициент подъемной силы перестает зависеть от безразмерной частоты. Однако, в статье [2] было обнаружено, что коэффициент подъемной силы линейно растет с безразмерной частотой в широком диапазоне значений частот. Работа направлена на определение безразмерного управляющего параметра задачи, характеризующего вибрационную подъемную силу, действующую на тело на расстоянии вязкого взаимодействия с границей, совершающей тангенциальные колебания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-71-00081).

Литература

- [1] Vlasova O. A., Kozlov V. G., Kozlov N. V. Lift force acting on a heavy solid in a rotating liquid-filled cavity with a time-varying rotation rate //Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – Т. 59. – №. 2. – С. 219-228.
- [2] Vlasova O., Karpunin I., Solomennikov M. Lift Force Acting on a Heavy Cylinder and a Steady Flow in an Unevenly Rotating Container // Microgravity Science and Technology. – 2020. – Т. 32. – №. 5. – С. 889-896.
- [3] Vibrational lift force acting on a body in a fluid near a solid surface //Doklady Physics. – Nauka/Interperiodica, 2005. – Т. 50. – №. 6. – С. 311-314.
- [4] Ivanova A. A., Kozlov V. G., Shchipitsyn V. D. Lift force acting on a cylindrical body in a fluid near the boundary of a cavity performing translational vibrations //Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2014. – Т. 55. – №. 5. – С. 773-780

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ. РОЛЬ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ЧАСТОТЫ

Власова О.А.¹, Дьякова В.В.², Козлов В.Г.¹

¹Пермский государственный гуманитарно - педагогический университет, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

vlasova_oa@pspu.ru, dyakova@pspu.ru, kozlov@pspu.ru

Экспериментально исследуется динамика двухжидкостной системы с осциллирующей границей раздела в вертикальном плоском щелевом канале при гармоническом изменении расхода прокачиваемой через канал жидкости. В качестве рабочих жидкостей используются следующие пары: силиконовое масло и водный раствор соли NaI; флуоринерт FC-40 и вода. Вязкость силиконового масла в экспериментах варьируется в широком диапазоне ($1-10^3$ сСт).

В работе изучается устойчивость горизонтальной осциллирующей границы раздела в зависимости от характера движения жидкостей в канале, который определяется безразмерной частотой $\omega = \Omega d^2/\nu$, где Ω – циклическая частота колебаний жидкости, d – толщина канала, ν – кинематическая вязкость жидкости. В случае, когда одна из жидкостей совершает вязкие колебания ($\omega_1 \sim 1$), а другая – невязкие ($\omega_2 \gg 1$) на границе раздела возникает неустойчивость по типу Саффмана-Тейлора [1-2]: «пальцы» маловязкого водного раствора соли на доле периода проникают в вязкую жидкость ПМС-1000 (рис.1, а). В случае, когда вязкость обеих жидкостей невелика ($\omega_{1,2} \gg 1$), при повышении амплитуды колебаний при заданной частоте обнаружено параметрическое возбуждение стоячих волн на межфазной границе (рис. 1, б). Таким образом, при осцилляциях границы раздела в предельных случаях проявляются различные механизмы возбуждения неустойчивости. Целью работы является определение условий, при которых доминирует один или другой механизм.

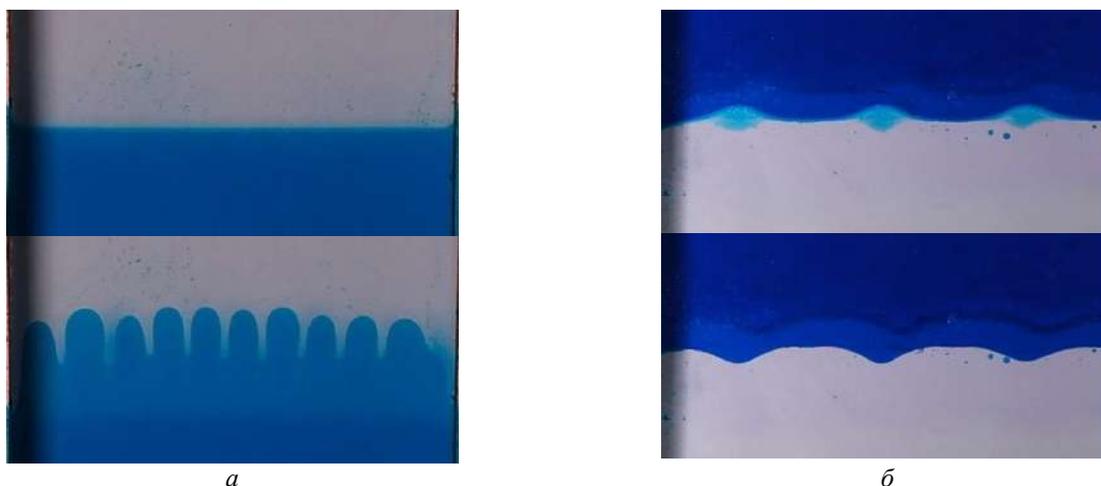


Рис. 1. Фотографии границы раздела в крайних положениях в ходе колебаний для двух пар жидкостей: а – подкрашенный водный раствор NaI – ПМС-1000; б – флуоринерт FC40 – подкрашенная вода

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (грант № 20-41-596011).

Литература

- [1] Kozlov V., Karpunin I., Kozlov N. Finger instability of oscillating liquid–liquid interface in radial Hele-Shaw cell // *Physics of Fluids*. – 2020. – V. 32. – №. 10. – P. 102102.
- [2] Kozlov V., Vlasova O. Oscillatory dynamics of immiscible liquids with high viscosity contrast in a rectangular Hele–Shaw channel // *Physics of Fluids*. – 2022. – V. 34. – №. 3. – P. 032121.

ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ГРАНИЦЫ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В ДЛИННОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Власова О.А., Полежаев Д.А.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
vlasova_o@pspu.ru, polezhaev@pspu.ru

Экспериментально исследуется структура осредненного течения в щелевом канале, заполненном жидкостями с высоким контрастом вязкости при наличии колебаний границы раздела. Рассматриваются смешивающиеся (вода и глицерин) и несмешивающиеся (вода и вязкое силиконовое масло ПМС-1000) жидкости, которые совершают колебания дозвуковой частоты в направлении, перпендикулярном межфазной границе. Наблюдения за межфазной границей показывают, что ее форма зависит от интенсивности колебаний. В отсутствие колебаний граница между жидкостями плоская. При малых амплитудах колебаний межфазная граница смешивающихся жидкостей сохраняет свою форму, но медленно расширяется вследствие взаимной диффузии двух жидкостей. При достижении критической амплитуды колебаний межфазная граница разрушается в середине канала, и маловязкая вода проникает внутрь глицерина в виде “языка”. В случае несмешивающихся жидкостей увеличение амплитуды колебаний приводит к тому, что изначально плоская граница раздела искривляется внутрь области, занимаемой вязким маслом. Величина этого искривления увеличивается с ростом амплитуды. При достижении критической амплитуды колебаний на межфазной границе возникает неустойчивость Саффмана – Тейлора в виде растущих и уменьшающихся “пальцев”. С целью изучения механизмов искривления межфазной границы и ее разрушения (в случае смешивающихся жидкостей) проведены измерения скорости осредненного течения в вязкой жидкости методом PIV (рис. 1). Обнаружено, что образование “языка” в глицерине сопровождается возникновением осесимметричного двухвихревого течения, направленного в центре полости вглубь вязкой жидкости и в противоположную сторону вблизи боковых стенок кюветы. Структура осредненного течения в силиконовом масле зависит от амплитуды колебаний: при малых амплитудах наблюдается течение из четырех вихрей, при этом два вихря вблизи межфазной границы имеют такую же закрутку, как и в глицерине, а два других – противоположную закрутку. При повышении амплитуды колебаний вихри вблизи межфазной границы растут и вытесняют другие вихри.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (грант № 20-41-596011).

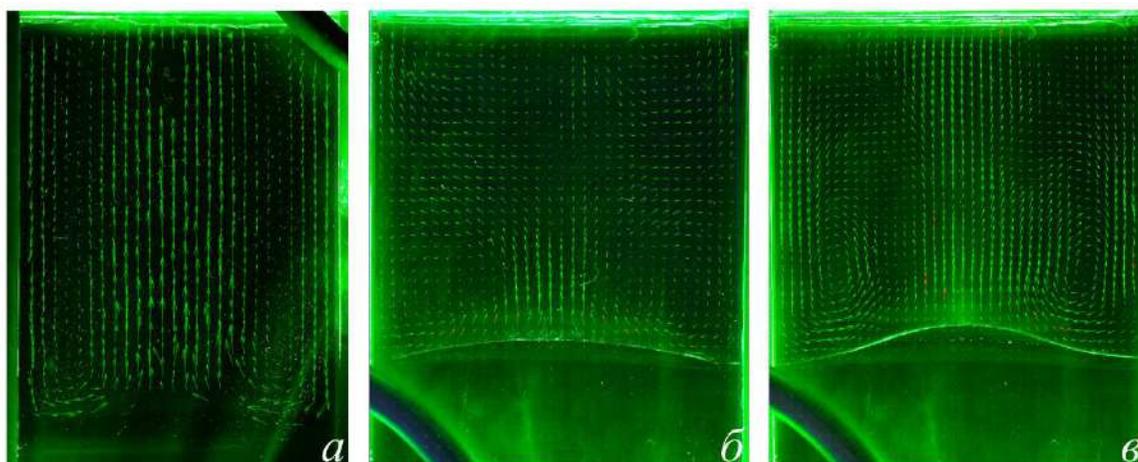


Рисунок 1 – Вихревые течения в глицерине (а) и силиконовом масле (б, в)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Волков Г.А.^{1,2}, Петров Ю.В.^{1,2}

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

²*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

g.volkov@spbu.ru, y.v.petrov@spbu.ru

Исследуется явление импульсной и акустической кавитации жидкостей. На основе подхода инкубационного времени [1,2] строится модель, позволяющая предсказывать критические значения параметров нагружающего воздействия достаточного для возникновения кавитации, а также момент времени начала самого процесса. В рамках построенной модели вычисляются зависимости пороговой амплитуды от длительности в случае импульсного нагружения, и от частоты при ультразвуковом воздействии. Также для импульсной кавитации производится оценка энергии нагружающего воздействия, которая вводится в среду перед моментом разрушения. Показано, что величина энергии разрушающего воздействия зависит от амплитуды и длительности импульса, и при некоторых значениях длительности эта зависимость имеет немонотонный характер. Таким образом, получается, что для некоторых длительностей воздействия, минимальная энергия, необходимая для разрушения среды, соответствует запороговому импульсу. Другими словами для каждой длительности можно выделить два вида пороговых воздействий, минимальные по амплитуде и по энергии.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ № 20-79-10078

Литература

- [1] G.A. Volkov, Yu.V. Petrov, A.A. Gruzdkov Acoustic Strength of Water and Effect of Ultrasound on the Liquid–Vapor Phase Diagram – *Technical Physics*, 2015, Vol. 60, No. 5, pp. 753–756
- [2] Volkov, G.A., Gruzdkov, A.A., Petrov, Y.V. A Randomized Approach to Estimate Acoustic Strength of Water. – In: Polyanskiy, V.A., K. Belyaev, A. (eds) *Mechanics and Control of Solids and Structures. Advanced Structured Materials*, 2022, vol 164. Springer

ОСРЕДНЕННАЯ ДИНАМИКА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ФЕРРОЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ВИБРАЦИОННОМ ПОЛЕ

Володин И.В.^{1,2}, Алабужев А.А.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ivanwolodin@gmail.com, alabuzhev@mail.ru

Динамика тонких пленок феррожидкости представляет интерес с точки зрения фундаментальной науки и может быть использована в различных приложениях [1,2]. Множество работ посвящено исследованию устойчивости магнитной жидкости со свободной поверхностью в однородных и неоднородных магнитных полях [3–5].

В данной работе проводилось теоретическое исследование динамики тонкого слоя магнитной жидкости под действием гармонических вибраций в стационарном вертикальном магнитном поле.

Рассматривается бесконечный горизонтальный слой феррожидкости со свободной поверхностью на твердой подложке. Над пленкой располагается невесомый газ, движение которого не влияет на динамику пленки. Жидкость считается вязкой и несжимаемой без свободных носителей заряда. На систему действуют вертикальные вибрации постоянной амплитуды и частоты. Задача решается в двумерной постановке.

Амплитуда внешних вибраций значительно превышает толщину слоя, продольный пространственный масштаб значительно больше вертикального, что позволяет использовать теорию тонкой пленки. Задача в такой постановке характеризуется наличием в ней процессов с разной временной иерархией, поэтому допустимо разделить все физические поля на быстрое (пульсационное), соответствующее колебаниям частоты внешних вибраций и осредненное [6].

Получены пульсационные поля скорости и температуры, решена задача линейной устойчивости для бегущей поверхностной волны. Получено уравнение для осредненной динамики системы, проведен слабонелинейный анализ решения. Показано, что наличие магнитного поля оказывает дестабилизирующий эффект, тогда как вибрации повышают устойчивость.

Литература

- [1] Суху Р. Магнитные тонкие пленки – М.: Мир, 1967. – 422 с.
- [2] Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография; под ред. А.С. Плехова. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева, 2017. – 94 с.
- [3] Cowley M.D., Rosensweig R.E. The interfacial stability of a ferromagnetic fluid // J. Fluid Mech. – 1967. – V. 30, part 4 – P. 671-688.
- [4] Müller H.W. Parametrically driven surface waves on viscous ferrofluids // Phys. Rev. E – 1998. – V. 58. – P. 6199–6205.
- [5] Коровин В.М. Неустойчивость Розенцвейга в тонком слое магнитной жидкости // Журнал технической физики. – 2013. – Т.58, Вып. 12. – С. 17–25
- [6] Alabuzhev A.A., Volodin I.V. Linear Instability of Forced Oscillations of a Thin Ferrofluid Film in a Vertical Magnetic Field // Microgravity Sci. Technol. – 2022. – V.34. – P.91

КОМПЛЕКСНЫЙ УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ В МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЯХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

Вшивкова А.А., Швейкин А.И., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
vshivkova.anastasiya@yandex.ru, shveykin@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

К настоящему моменту накоплено большое количество экспериментальных данных о существенном влиянии температуры и скорости деформации на поведение материала [1]. Поскольку структура материала эволюционирует по-разному при различных историях воздействия, сценариях изменения воздействий, имеет место комплексная зависимость отклика материала от температуры и скорости деформации. Это особенно важно учесть при моделировании технологических процессов термомеханической обработки, чувствительных к температуре и скорости деформации (в частности, сверхпластического формования).

Целью работы является модификация базовой двухуровневой статистической конститутивной модели (КМ) [1], основанной на физической теории пластичности, путем комплексного учета влияния температурно-скоростных условий на реализацию основных механизмов неупругого деформирования и изменение структуры материала.

На основе физических соображений сформулированы критерии, которым должна удовлетворять структура соотношений модифицированной КМ: она должна учитывать влияния температуры и скорости деформации на скорость изменения критических напряжений, а также влияние текущего мгновенного изменения температуры и скорости деформации на текущее значение критических напряжений.

В результате аналитического обзора способов учета зависимости в двухуровневых КМ чувствительности к температуре и скорости деформации выбран подход, включающий элементы дислокационно-ориентированных КМ [2, 3]. Чувствительность к температурно-скоростным условиям учитывается путем модификации закона упрочнения при сохранении стандартного степенного вязкопластического соотношения для скоростей сдвигов. Закон упрочнения, принятый в [3], был приведен к формулировке в терминах скоростей сдвигов по системам скольжения путем исключения плотностей дислокаций. Предложенная модифицированная двухуровневая КМ была использована для анализа поведения ГЦК-поликристалла алюминиевого сплава при различных нагружениях, в том числе – в случае изменяющихся температурно-скоростных условий. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными и физическими соображениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.
- [2] Beyerlein I.J., Tome C.N. A dislocation-based constitutive law for pure Zr including temperature effects // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – P. 867–895.
- [3] Terentyev D., Xiao X., Dubinko A., Bakaeva A., Duan H. Dislocation-mediated strain hardening in tungsten: Thermo-mechanical plasticity theory and experimental validation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2015. – Vol.85. – P.1–15.

ПРЯМАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ: ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ СВОБОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Вяткин Я.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
viatkiniv@gmail.com*

Значительную роль в инициации пластических деформаций в механических испытаниях играют границы образца [1]. В связи с этим при анализе даже простейших натуральных испытаний (например, на одноосное растяжение) возникают различные вопросы. Прежде всего: поведение чего именно исследуется в этих опытах – материала или образца (конструкции)? Описывается ли поведение материала в объеме исследуемого изделия и вблизи его границы одними и теми же определяющими соотношениями? Приведенные вопросы представляются особенно важными при необходимости исследовать поведение миниатюрных изделий [2]. Следует отметить, что при использовании широко распространенных физических теорий пластичности для одного из основных механизмов пластических деформаций – скольжения краевых дислокаций [3], – не учитываются особенности их поведения вблизи свободных границ. Однако наличие внутренних и внешних границ оказывает существенное влияние на поведение дислокаций и прочих дефектов решетки [4]. Считается, что вблизи свободных границ происходит разупрочнение систем скольжения (СС), т.к. дислокации могут практически беспрепятственно выходить на поверхность [5]. Для описания разупрочнения вводятся так называемые напряжения «релаксации» [6], обеспечивающих удовлетворение тривиальным статическим граничным условиям.

В предлагаемой работе предпринята попытка построения и анализа закона разупрочнения для систем скольжения приграничных кристаллитов, связанного с влиянием свободной поверхности. Предложенные законы разупрочнения были использованы в прямой модели для описания неупругого деформирования мезо- и макроуровня.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Yants A., Trusov P., Tokarev A. Direct crystal plasticity model for describing the deformation of samples of polycrystalline materials: influence of external and internal grain boundaries // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2021. – Vol.12, Is.2. – P.1-21.
- [2] Трусов П.В. Классические и многоуровневые конститутивные модели для описания поведения металлов и сплавов: проблемы и перспективы (в порядке обсуждения) // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. — 2021. — № 1. — P. 69–82.
- [3] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с.
- [4] Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // *Физическая мезомеханика*. — 2006. — Vol.9, Is.3. — P. 9–22.
- [5] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
- [6] Lothe J., Indenbom V.L., Chamrov V.A. Elastic field and self-force of dislocations emerging at the free surfaces of an anisotropic halfspace // *Physica Status Solidi (b)*. — 1982. — Vol.111, Is.2. — P. 671–677.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Гаврилов А.А.¹

¹ Красноярский филиал Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Красноярск
gavand@yandex.ru

Реальные жидкости могут проявлять одновременно несколько неньютоновских свойств, включая не только упругость, но и пластичность. Турбулентные течения как вязкопластической так и упруго- вязкопластической среды замечательны снижением сопротивления по сравнению с течением ньютоновской жидкости. Одновременное влияние эффектов упругости и пластичности изучено слабо, а решение задачи построения статистических моделей турбулентности неньютоновских жидкостей еще далеко до завершения.

Доклад посвящен исследованиям турбулентных течений неньютоновских жидкостей, а именно вязкопластических, псевдопластических и упруго- вязкопластических сред, с помощью численного моделирования. Представлены результаты моделирования канальных течений с помощью прямого численного моделирования турбулентности, раскрывающие особенности пристеночной турбулентности, баланса напряжений и баланса турбулентной кинетической энергии [1]. Построение статистических моделей турбулентности сопряжено с необходимостью построения замыкающих соотношений для дополнительных неньютоновских слагаемых. Представлены статистические многопараметрические модели турбулентности неньютоновских сред, способные адекватно предсказать основные особенности пристеночных турбулентных течений, в частности увеличение степени анизотропии турбулентных пульсаций и снижение сопротивления [2].

В докладе представлены результаты прямого численного моделирования полностью развитого турбулентного течения в прямой трубе неупругой вязкопластической жидкости и упруго-вязко-пластической среды. В течении сред с релаксацией напряжений наблюдаются два механизма снижения сопротивления – вязкий [3] и упругий [4]. Однако, существенное падение сопротивления при увеличении упругих свойств среды может быть объяснено развитием релаксационного механизма переноса энергии от упругой компоненты к турбулентной в буферном пристеночном подслое.

Литература

1. Gavrilov, A.A., Rudyak, V.Y. Direct numerical simulation of the turbulent energy balance and the shear stresses in power-law fluid flows in pipes // Fluid Dynamics 52(3), 2017, с. 363-374.
2. Gavrilov A.A., Rudyak V.Ya., Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 227, 2016, pp. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2015.11.006>.
3. L'vov V.S., Pomyalov A., Procaccia I., and Tiberkevich V., 2004, Drag Reduction by Polymers in Wall Bounded Turbulence // Phys. Rev. Lett. 92, 244503
3. Dubief, Y., Terrapon, V.E. & Soria, J. On the mechanism of elasto-inertial turbulence // Phys. Fluids, 25, (2013), 110817.

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРУГЛОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Гареев Л.Р.¹, Ашууров Д.А.¹, Веденеев В.В.¹, Иванов О.О.¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва
gareev.lr@yandex.ru, ashurovda@my.msu.ru, vasily.vedeneev@mail.ru, ivanov@imec.msu.ru

В пристенных течениях, наряду с ростом модальной неустойчивости, имеет место немодальный «lift-up» механизм линейного роста возмущений. Этот механизм вызывает сильное нарастание трехмерных возмущений и приводит к «bypass» сценарию перехода к турбулентности [1]. Кинетическая энергия возмущений при этом увеличивается гораздо быстрее вниз по потоку по сравнению с энергией собственных мод. В неограниченных течениях, таких как затопленные струи, теоретические исследования немодального механизма проводились только в последнее десятилетие [2], [3]. Этот механизм еще не был экспериментально обнаружен в струях, и его роль в переходе к турбулентности в таких течениях остается неясной.

Данная работа посвящена экспериментальной части исследования развития возмущений в осесимметричной ламинарной затопленной струе ($D = 0.12$ м, $Re = 5400$). Струйное течение формируется устройством специального вида, благодаря особой конструкции которого исследуемая затопленная струя остается ламинарной на очень длинном участке ($5D$ и более), что позволяет отслеживать развитие возмущений глубоко вниз по потоку [4].

Описываемое течение имеет профиль скорости отличный от «классических» – он имеет три точки перегиба, которые генерируют два семейства растущих возмущений. Были проведены эксперименты по исследованию модального механизма роста возмущений в таком течении. При помощи тонкого колеблющегося металлического кольца в струю вносились осесимметричные возмущения с разными частотами.

Для исследования немодального механизма были разработаны специальные тонкие волнистые конструкции (дефлекторы), которые вносили стационарных возмущений с разными азимутальными волновыми числами n .

Были проведены серии визуализации струи лазерным ножом, термоанемометрических экспериментов и PIV измерений. Сравнение экспериментальных данных и расчетных, полученных в рамках линейной теории устойчивости, по изучению собственных возмущений показало хорошее соответствие [5]. Изучение немодального роста выявило, что благодаря внесению стационарных возмущений, немодальный механизм возбужден и характерные продольные вихревые структуры обнаружены, а параметры их развития вниз по потоку соответствуют имеющимся теоретическим представлениям.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00404.

Литература

- [1] Matsubara M., Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence – J. Fluid Mech. 2001. V. 430. P. 149–168.
- [2] Boronin S.A., Healey J.J., Sazhin S.S. Non-modal stability of round viscous jets – J. Fluid Mech. 2013. V. 716. P. 96–119.
- [3] Jimenez-Gonzalez J.I., Brancher P., Martinez-Bazan C. Modal and non-modal evolution of perturbations for parallel round jets – Physics of Fluids. 2015. V. 27. №. 4. 044105.
- [4] Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Чичерина А.Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка – Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 97–106.
- [5] Gareev L.R., Zayko J.S., Chicherina A.D., Trifonov V.V., Reshmin A.I., Vedeneev V.V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet – J. Fluid Mech. 2022. V. 934. A3.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Гаришин О.К.¹, Свистков А.Л.¹, Возняковский А.П.²,
Цыпкина И.М.², Неверовская А.Ю.², Шадрин В.В.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Научно-исследовательский институт синтетического каучука, Санкт-Петербург
gar@icmm.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований вязкоупругих свойств нанокомпозитов на основе бутадиен-стирольного каучука с наполнителями из технического углерода (ТУ), а также одностенных (ОУНТ) и многостенных (МУНТ) углеродных нанотрубок. Углеродные нанотрубки подвергались предварительной очистке по разработанной авторами технологии с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Это позволило удалить из наполнителя аморфный углерод и нежелательные неорганические примеси (в основном металлические), образующиеся при их изготовлении [1].

Для всех образцов использовали одну и ту же программу циклических испытаний с нарастающей амплитудой по деформациям и кратковременными остановками на релаксацию при смене направления движения захватов разрывной машины. Таким образом, за один эксперимент удавалось получить информацию, как об упругих, так и о вязких свойствах материала.

Было установлено, что в эластомерах, наполненных очищенными одностенными углеродными нанотрубками, возможно появление значительной анизотропии механических свойств, связанное с особенностями изготовления образцов. Она выражается в многократном возрастании жесткости материала и увеличении диссипативных потерь при его деформировании в направлении, соответствующем движению вулканизируемой смеси при вальцевании (тогда как в перпендикулярном направлении этот эффект выражен намного слабее). Начальный модуль для композитов с наполнителем из ТУ+ОУНТ был примерно в 7.7 раза больше по сравнению композитами, содержащими ТУ+МУНТ, а максимальные напряжения (при растяжении в 1.5 раза) в 10 раз. Для композитов с ТУ+ОУНТ анизотропия по упругому модулю равнялась 4.6, а по максимальным напряжениям — 5.3.

По мнению авторов это связано с тем, что длина ОУНТ намного больше по сравнению с МУНТ, и тем более с характерными размерами частиц технического углерода. Этот эффект может оказаться весьма важным и полезным в прикладном плане. Например, с помощью нескольких достаточно простых в реализации технологических операций можно существенно улучшить демпфирующие свойства резинового амортизатора из наполненной ОУНТ резины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596013.

Литература

- [1] Voznyakovskii A.P., Neverovskaya A.Yu., Otvalko Ja.A., Gorelova E.V., Zabelina A.N., Lebedev S.V. Facile synthesis of 2D carbon structures as a filler for polymer composites // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2018. – V. 9, No 1. – P. 125-128.
- [2] Garishin O.K., Svistkov A.L., Voznyakovskii A.P., Tshypkina I.M., Neverovskaya A.Yu., Shadrin V.V. Anisotropic mechanical properties of elastomeric nanocomposites filled by carbon black, few-layer graphene, and carbon nanotubes // *Materials Physics and Mechanics*. 2022. – V. 50, No 3. – P. 495-508.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МАКРОРАЗРЫВА В ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ С 1D, 2D И 3D НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Гаришин О.К.¹, Шадрин В.В.^{1,2}

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
gar@icmm.ru, shadrin@icmm.ru

Проблема возникновения и развития макроразрыва в наполненных эластомерах хорошо знакома специалистам по композитным материалам [1]. В данной работе проведены экспериментальные исследования процессов разрушения при растяжении эластомерных нанокompозитов на основе силоксанового каучука с наполнителями различной формы: одно и многостенные углеродные нанотрубки (1D наполнитель), малослойный графен (2D наполнитель), детонационные наноалмазы (3D наполнитель) [2]. Для экспериментов использовались лопаточные образцы с малым боковым разрезом на его середине (размеры рабочей части 2×6×25 мм, глубина начального разреза 1 мм). Процесс монотонного равномерного растяжения записывался на видео, что позволило зафиксировать траектории прорастания магистральной трещины в образце на разных стадиях деформирования и провести соответствующий анализ.

Экспериментальные исследования процессов разрушения эластомерных нанокompозитов на основе силоксанового каучука с 1D, 2D и 3D наполнителями показали следующее:

Во всех случаях траектория прорастания макротрещины отклонялась от первоначального направления (задаваемого иницирующим надрезом перпендикулярно боковой поверхности образца). Следует отметить, что при аналогичных испытаниях на растяжение ненаполненного бутадиен-стирольного каучука трещина практически не отклонялась от изначально заданного направления и проходила перпендикулярно боковой поверхности образца.

При испытаниях как чистого силоксанового каучука, так и композитов с 1D и 2D наполнителями трещина прорастала по одной хоть и извилистой траектории без появления боковых ответвлений.

В случае же использования углеродных нанотрубок (как одно- так и многостенных) процесс разрушения развивался по-другому: прорастание трещины сопровождалось множественным появлением мелких быстро затухающих боковых ответвлений, в результате чего поверхность берегов трещины приобретала неровный "зубчатый" характер. Использование двойного наполнителя (1D+2D частицы) значительно усиливало эффект. Всё это должно положительно сказываться на сохранении определенной части несущей способности материала в процессе развития поврежденности.

В итоге можно сделать вывод, что исследования такого рода позволяют лучше понять особенности развития разрушения таких материалов и учесть эти эффекты при разработке новых изделий и их эксплуатации.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7 (2020)

Литература

- [1] Gent A.N. Razzaghi-Kashani M. Named G.R. Why do cracks turn sideways? // Rubber Chemistry and Technology. – 2003. – V. 76(1). – P. 122-131.
[2] Гаришин О. К., Шадрин В. В. Исследование развития макроразрыва в эластомерных композитах // Вестник Пермского университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 21-30.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГЛОЩАЮЩЕГО СЛОЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ

Гачегова Е.А., Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Плехов О.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

gachegova.e@icmm.ru, vshivkov.a@icmm.ru, fedorova@icmm.ru, poa@icmm.ru

В настоящее время лазерная ударная проковка (ЛУП) является одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения металлов. Она позволяет увеличить ресурс деталей, улучшить их усталостные свойства и коррозионную стойкость. Сам метод заключается в создании сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое материала на глубине до 1 мм путем генерации импульса давления, вызванного процессом взаимодействия лазерного излучения с веществом. Для защиты обрабатываемой поверхности от прямого воздействия лазерного излучения на нее предварительно наносят покрытие (металлическая фольга, лента или черная краска), выступающее в качестве поглощающего слоя. Помимо этого, для увеличения давления растущей плазмы используют так называемый ограничивающий слой, в качестве которого выступает вода или стекло.

С целью достижения необходимого результата обработки требуется подбирать множество различных параметров ЛУП. Одним из таких параметров является материал поглощающего слоя. Этот слой не только способствует образованию плазмы, но также служит в качестве теплового изолятора, исключая температурное воздействие лазерного излучения на материал образца. В литературе встречается несколько вариантов покрытий: в работе [1] использовалась алюминиевая фольга толщиной 100 мкм, а в статье [2] исследователи в качестве поглощающего слоя использовали черную виниловую ленту. Также нередко встречаются работы, где обработка проходит вообще без покрытия [3], то есть лазерное излучение напрямую воздействует на поверхность образцов.

В связи с этим, целью данной работы является изучение влияния вида материала, а также его толщины на состояние поверхности образцов и распределение остаточных напряжений после ЛУП. Для обработки поверхности использовался Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс. Квадратные образцы толщиной 2 мм из титанового сплава Вt6 подвергались лазерному ударному воздействию с частотой 5 Гц. Профиль лазерного луча представлял собой квадрат со стороной 1 мм, энергия импульса составляла 2 Дж. В качестве поглощающего слоя исследовались три вида покрытий: алюминиевая фольга толщиной 80 и 160 мкм и виниловая лента 100 мкм. Во время обработки целостность виниловой ленты и фольги толщиной 80 мкм нарушалась, что приводило к образованию нагара на поверхности образцов. Наименьшее изменение состояния поверхности наблюдалось при использовании алюминиевой фольги толщиной 160 мкм. При этом величина создаваемых в материале остаточных напряжений и глубина упрочненного слоя изменились незначительно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10168.

Литература

- [1] Ge M. Z., Xiang J. Y. Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 680. – P. 544-552.
- [2] Elango K. et al. Studies on ultra-short pulsed laser shock peening of stainless-steel in different confinement media //Surface and Coatings Technology. – 2020. – V. 397. – P. 125988.
- [3] Jose B. et al. Effect of laser shock peening without coating (LPwC) on a surface and sub-surface characteristics of aged Ti 15 V-3Al-3Cr-3Sn alloy //Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 46. – P. 578-582.

РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НЕГОМОГЕННЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Герасимов О.В.¹, Рахматулин Р.Р.¹, Саченков О.А.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

valeriy.karasikov@gmail.com, rrahmatulin852@gmail.com, 4works@bk.ru

Применение данных компьютерной томографии выступает актуальным подходом к построению цифрового двойника объекта. Полученные о пространственном распределении свойств материала данные позволяют провести усреднение механических параметров элементов негетогенных пористых сред. В этом случае наиболее распространёнными подходами оказываются построение *MIL*-распределения [1] и представительные объёмные элементы [2]. В данной работе предлагается третий подход, основанный на прямом учёте свойств материала методом взвешенного интегрирования матрицы жёсткости каждого конечного элемента сетки. Целью исследования выступает статический расчёт и оценка прочностных параметров костных образцов на основе данных их компьютерной томографии.

Метод предполагает введение весовой функции, значения которой соответствуют данным о проницаемости среды в текущей точке интегрирования [3]. Полученные путём сканирования данные бинаризируются с целью отделения твёрдого вещества от материала в порах. Конечные элементы с низким содержанием костной ткани исключаются из исходной регулярной прямоугольной сетки. На основе полученных после статического расчёта данных определяется напряжённо-деформированное состояние, значения которого, в силу неравномерного распределения материала, в дальнейшем локально усредняются по объёму каждого конечного элемента. Оценка расчётных величин проводится методом вычисления нормированной ошибки энергии.

Численные и натурные эксперименты проводились на образце плечевой кости вьетнамской свиньи. Протокол эксперимента был одобрен Комитетом по уходу за животными Казанского государственного медицинского университета (протокол №5 от 20 мая 2020 года) [4]. Параметры нагружения соответствовали трёхточечному изгибу. Результаты численного моделирования показали, что максимальные значения ошибки энергии определялись элементами на границе, что объясняется особенностями учёта твёрдого вещества в текущем конечном элементе. Максимальные напряжения по Мизесу и минимальная ошибка энергии (5.9%) принадлежали области нагружения, что достоверно описывает образование трещины в данной области в натурном эксперименте.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам (СП-4182.2022.4).

Литература

- [1] Kichenko, A.A., Tverier, V.M., Nyashin, Y.I., Zaborskikh, A.A. Experimental determination of the fabric tensor for cancellous bone tissue // *Russ. J. Biomech.* – 2011. – Vol. 15(4). – P. 66-81.
- [2] Ridwan-Pramana, A., Marcian, P., Borak, L., Narra, N., Forouzanfar, T., Wolff, J. Finite element analysis of 6 large PMMA skull reconstructions: A multi-criteria evaluation approach // *PLoS ONE.* – 2017. – Vol. 12. – e0179325.
- [3] Rho, J.Y., Hobatho, M.C., Ashman, R.B. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone // *Medical Engineering & Physics.* – 1995. – Vol. 17(5). – P. 347-355.
- [4] F. Fadeev, A. Eremeev, F. Bashirov, R. Shevchenko, A. Izmailov, V. Markosyan, M. Sokolov, J. Kalistratova, A. Khalitova, R. Garifulin, R. Islamov, I. Lavrov. Combined Supra- and Sub-Lesional Epidural Electrical Stimulation for Restoration of the Motor Functions after Spinal Cord Injury in Mini Pigs // *Brain Sci.* – 2020. – Vol. 10(10). – P. 744.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПРЕРЫВИСТОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Герасимов Р.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
romagrizly@gmail.com

Рассматривается структура и математическая формулировка физически-ориентированной многоуровневой конститутивной модели, учитывающей наиболее важные механизмы, ответственные за возникновение немоногоотонного отклика на монотонно изменяющиеся воздействия (так называемого эффекта прерывистой пластичности) [1]. Отмечается, что физические механизмы, обуславливающие прерывистую пластичность, реализуются на всех структурно-масштабных уровнях в широком диапазоне изменения параметров воздействий и проявляются в макроскопической неустойчивости пластического деформирования.

В качестве базовой используется физически-ориентированная упруговязкопластическая конститутивная модель для описания неупругого деформирования поликристаллических сплавов, предложенная в работе [2]. Основным механизмом исследуемого эффекта принимается взаимодействие дислокаций с примесными атомами, поскольку известно, что при решеточной или туннельной диффузии примесных атомов вблизи дислокаций формируются атмосферы примесных атомов, которые затрудняют их движение [3]. Дислокации могут отрываться из окружающих их атмосфер примесных атомов или двигаться вместе с ними в зависимости от скорости движения дислокаций и способности атомов примесей к диффузии. В свою очередь, коллективные отрывы дислокаций от атмосфер примесных атомов вызывают немоногоотонность отклика материала.

При построении конститутивной модели основное внимание уделено разработке подмодели мезоуровня-2, которая включает в себя эволюционные соотношения для концентрации захваченных и свободных атомов примеси, учитывающие эволюцию дислокационной структуры за счет зарождения дислокаций по механизму Франка-Рида, а также аннигиляцию дислокаций. На основе базовой модели [2] предложены концептуальная и математическая постановки трехуровневой математической модели неупругого деформирования для описания эффекта прерывистой пластичности. Разработаны алгоритм и программа численной реализации предложенной математической модели, получены количественные характеристики изменения концентрации свободных и захваченных на различных системах скольжения примесных атомов. Предложены процедуры идентификации и верификации предложенной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (государственное задание лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.: МЕТАЛЛУРГИЗДАТ, 1958. – 268 с.
- [2] Trusov P.V., Gribov D.S. The three-level elastoviscoplastic model and its application to describing complex cyclic loading of materials with different stacking fault energies // Materials. – 2022. – Vol. 15. – 760.
- [3] Benallal A. et al. Effects of strain rate on the characteristics of PLC deformation bands for AA5083-H116 aluminium alloy / Benallal A., Berstad T., Børvik T., Hopperstad O.S., Nogueira de Codes R. // Philosophical Magazine. – 2008. – Vol.88, Nos.28-29. – P.3311-3338.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Герасимов Р.М.¹, Чечулина Е.А.¹, Грибов Д.С.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
romagrizly@gmail.com, zhenya-chechulina@yandex.ru, gribovds@pstu.ru

В рамках исследования влияния сложного нагружения (СН) на характеристики напряженно-деформированного состояния при деформировании алюминиевых сплавов в режиме прерывистой пластичности была проведена обработка экспериментальных кривых с помощью вейвлет-анализа.

В качестве материала для исследования был выбран алюминиевый пруток АМг6М в состоянии поставки (Ø28 мм, толщина стенки 5мм). Вырезка тонкостенных трубчатых образцов для испытаний осуществлялась на станке токарном патронно-центровом с числовым программным управлением (ЧПУ) по ГОСТ 25.505-85. Для достижения однородности микроструктуры и снятия остаточных напряжений образцы сплава АМг6М отжигали в муфельной печи ПМ-14 при 400°C в течение 3 часов и охлаждали в печи до комнатной температуры.

Выбор сплава АМг6М определялся важностью проблемы устойчивости его деформационного поведения в связи с широким применением в авиационной технике, судостроении, химической промышленности и транспортном машиностроении.

Проведены механические испытания на совместное растяжение с кручением при пропорциональном изменении деформаций. Нагружение реализовано на двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850. Управление испытанием осуществлялась с помощью двухосевого навесного экстензометра. Реализованы скорости деформирования: $\varepsilon = 0,00056 \text{ с}^{-1}$ и $\gamma = 0,00068 \text{ рад/с}$.

С использованием вейвлет-анализа проведена обработка сигнала натурального эксперимента по растяжению образца в контексте изучения механизмов прерывистой пластичности. При исследовании исходного сигнала с помощью непрерывного вейвлет-преобразования использовалось семейства комплексных вейвлетов Морле [1], позволяющих хорошо локализовать частоты сигнала, которые проявляются лишь на его части (как проявляется и эффект прерывистой пластичности). С помощью вейвлет-анализа получено компактное представление натуральных экспериментов в виде амплитудно-частотных характеристик, обеспечивающее возможность качественного анализа эффекта прерывистой пластичности. Сформулированы гипотезы, связывающие появление полос на вейвлет скейлограммах с механизмами эффекта прерывистой пластичности, в частности, с коллективным отрывом дислокаций от «атмосфер» примесных атомов.

Механические испытания выполнены в Центре экспериментальной механики с использованием УНУ «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 20-79-10235).

Литература

[1] Goupillaud P., Grossman A., Morlet J. Cycle-Octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis. // Geoprospection. – 1984. – Vol. 23, Iss. 1. – P. 85-102.

ЗАДАЧА О ПРОВЕТРИВАНИИ ТУПИКОВЫХ КАМЕР КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Герцен Т.А., Любимова Н.Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
tanger59perm@yandex.ru, ninalubimova@yandex.ru*

При буровзрывном способе проведения выработок основное выделение примеси происходит при взрывных работах. Газообразной примесью считаем любой газ, поступающий в поток воздуха. Турбулентное движение воздуха сопровождается конвективной, турбулентной и в незначительной степени молекулярной диффузией. Процесс турбулентной диффузии протекает в сотни раз интенсивнее, чем молекулярной. Конвективный перенос осуществляется движущимся воздухом, поэтому направление конвективного потока совпадает с направлением средней скорости потока. С увеличением средней скорости движения воздуха, интенсивность конвективного переноса увеличивается. Процесс конвективно-турбулентной диффузии начинается сразу же после взрыва.

Рассмотрена одномерная задача нахождения относительной концентрации примеси на выходе из n -й камеры при мгновенном одновременном выделении примеси (продуктов взрыва) в тупиковой части ряда последовательно проветриваемых камер. Камеры расположены сбоку от сквозной выработки на пути вентиляционной струи воздуха. Выделение примеси происходит в результате взрыва произведенного одновременно в забое ряда камер. Можно считать, что граница зоны отброса продуктов взрыва совпадает с концом воздухоподающего трубопровода. В этом случае предположим, что изменение с течением времени концентрации примеси в плоскости фронта может быть представлено в виде зависимости, близкой к экспоненциальной. В остальной части камеры изменение концентрации описывается уравнением турбулентной диффузии с комбинированными граничными условиями. В каждую последующую камеру поступает уже частично загазованная струя. Таким образом, получена зависимость изменения концентрации газообразной примеси для каждой из последовательных тупиковых камер.

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫБОРА АКТИВНЫХ СИСТЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ТИПА ТЕЙЛОРА-БИШОПА-ХИЛЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ (НА ПРИМЕРЕ МАТЕРИАЛОВ С ГЦК И ОЦК РЕШЕТКАМИ)

Гладких П.А.¹, Глебов М.А.²

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gladkikh.p@yandex.ru, maglebov@mtm.permkrai.ru

Для описания деформирования поликристаллических металлов и сплавов эффективным «инструментом» являются двухуровневые статистические модели, основанные на физических теориях пластичности, в которых поведение элементов мезоуровня (зерен, субзерен) рассматривается относительно независимо друг от друга. Большинство моделей этого класса восходят к модели типа Тейлора – Бишопа – Хилла (ТБХ) [1, 2]. Однако у моделей данного класса имеется серьезный недостаток – неопределенность в выборе совокупностей активных систем скольжения (СС) на каждом шаге нагружения.

Указанное обстоятельство является одной из существенных трудностей построения статистических моделей данного типа. Для ее преодоления разрабатываются упругопластические и упруговязкопластические модели, устраняющие некоторые недостатки ТБХ. Среди них – упругопластическая модель Линя [3], которая и принята в настоящей работе в качестве базовой.

Целью данной работы является выяснение наличия или отсутствия влияния выбора активных СС на напряженно-деформированное состояние (НДС) на начальной стадии деформирования, а также развитие подхода для решения проблемы неопределенности выбора активных СС при описании процессов упругопластического деформирования моно- и поликристаллических материалов.

Разработана собственная программа реализации алгоритма приведенной модели для проведения численных экспериментов по моделированию упругопластического деформирования при различных параметрах упрочнения и наличии ротации. Приведены и анализируются результаты исследования влияния выбора активных СС на НДС представительного макрообъема (образца). В качестве первого численного эксперимента и оценки влияния неопределенности на НДС образца рассмотрено квазиодноосное растяжение образца из поликристаллической меди (ГЦК-решетка) с чистотой 99,99%. Представительный макрообъем состоит из 500 кристаллитов. Помимо этого, рассматривались численные эксперименты с ОЦК решеткой (вольфрам). Рассмотрены различные варианты случайного выбора наборов СС из числа потенциально активных. Полученные результаты исследования деформирования образцов свидетельствуют о значительном влиянии выбора активных СС на НДС даже на начальной стадии деформирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (государственное задание лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Taylor G.I. Plastic strain in metals // J. Inst. Metals. – 1938. – Vol.62. – P.307–324.
- [2] Bishop J.F., Hill R. A theory of the plastic distortion of a polycrystalline aggregate under combined stresses // Phil. Mag. Ser.7. – 1951. – Vol.42, No.327. – P.414–427. DOI: 10.1080/14786445108561065.
- [3] Трусов П.В., Швейкин А.И. Теория пластичности. – Пермь: Изд-во Перм. национ. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 419 с.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ НАГРЕТЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
arseniy34259@gmail.com

К настоящему времени решению проблемы детализации процесса разрушения конвективного факела тороидального вида в ходе формирования структуры течения, вызванного локальным нагревом тел конечных размеров, посвящено множество работ [1,2,3]. Полученные в них наработки находят применение в проектировании систем охлаждения и вентиляции. Однако при изучении литературы, не было обнаружено исследований, направленных на описание развития конвективного течения над поверхностью нагретых пластин различной формы.

В связи с этим в работе исследуется свободная тепловая конвекция над нагретыми пластинами в форме различных правильных n -угольников, вписанных в окружность с фиксированным диаметром D . Проводится численное трехмерное моделирование в резервуаре, заполненном водой при фиксированных граничных условиях. Рассматривается начальная стадия развития тепловой конвекции при различных значениях управляющего параметра, в качестве которого выступает число Релея Ra , определенное по соотношению между площадью и периметром нагревателя. Особое внимание уделяется изучению структуры течения жидкости, а также эволюции температурного поля в плоскости центрального сечения пластин. В рамках исследования рассматриваются различные условия нагрева: $n \in (3, 5)$, $Ra \in (1.0 \cdot 10^2, 1.3 \cdot 10^5)$. Стандартная система уравнений Навье-Стокса численно решается методом конечных элементов для систематического изучения конвекции от источников тепла различных размеров с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics.

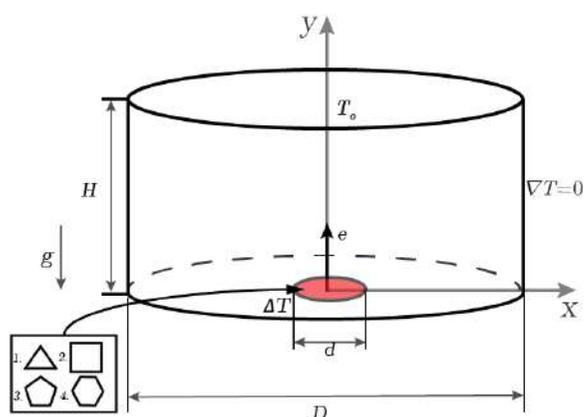


Рисунок 1 – Схема расчетной области

В ходе работы показана зависимость значения критического числа Релея от фактора формы нагревателя, при котором наблюдается разрушение торообразного течения. Кроме того, проводится экспериментальное исследование для проверки результатов численного моделирования. В результате получено качественное соответствие расчетной и наблюдаемой структур течения в ходе экспериментов.

Литература

- [1] Matvey Maksimovich G. et al. Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.
- [2] Fan Y. et al. Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications // Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 10. – С. 101301.
- [3] Jiang Y., Nie B., Xu F. Scaling laws of buoyant flows on a suddenly heated horizontal plate // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 105. – С. 58-64.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ НАГРЕТЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
arseniy34259@gmail.com

В проведенном исследовании изучены конвективные структуры, возникающие в полости, заполненной несжимаемой жидкостью. В качестве нагревателей выступают медные угольные пластины, вписанные в окружность с фиксированным диаметром D . Схема установки представлена на (рисунке 1 а). Рассматривается начальная стадия развития тепловой конвекции при различных значениях управляющего параметра, в качестве которого выступает число Релея Ra , определенное по соотношению между площадью и периметром нагревателя. Особое внимание уделяется изучению структуры течения жидкости, а также эволюции температурного поля в плоскости центрального сечения пластин. В рамках исследования рассматриваются различные условия нагрева: $n \in (3, 5)$, $Ra \in (1.0 \cdot 10^2, 1.3 \cdot 10^5)$. Результаты натурного эксперимента (рисунке 1 б) качественно совпадают с результатами численного расчета (рисунке 1 в), который проведен в Ansys методом конечных объемов в приближении Буссинеска.

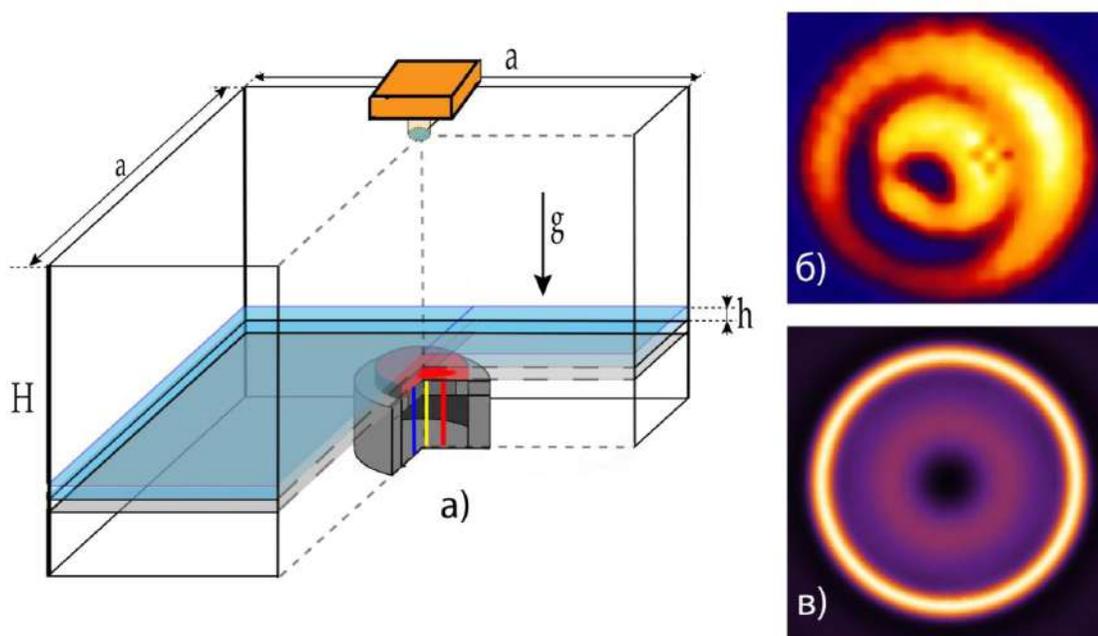


Рисунок 1 – Схема установки (а), натурный эксперимент с круглым нагревателем (б), численный эксперимент с круглым нагревателем (в)

Литература

- [1] Matvey Maksimovich G. et al. Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.
- [2] Fan Y. et al. Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications // Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 10. – С. 101301.
- [3] Jiang Y., Nie B., Xu F. Scaling laws of buoyant flows on a suddenly heated horizontal plate // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 105. – С. 58-64.

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ ГОРИЗОНТОВ В ЗАТОПЛЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ КОЛЕБАНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Голдобин Д.С.^{1,2}, Долматова А.В.^{1,3}

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

³*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва*

denis.goldobin@gmail.com, anastasiya.v.dolmatova@gmail.com

В работе исследуется неизотермический диффузионный перенос слабо растворимого вещества в пористой среде, насыщенной жидкостью, при контакте с резервуаром этого вещества. Температура поверхности полупространства пористой среды периодически изменяется во времени, что приводит к появлению затухающей волны растворимости, распространяющейся вглубь пористой среды. В такой системе зоны насыщенного раствора и нерастворенной фазы сосуществуют с зонами недонасыщенного раствора. Описываемый эффект рассмотрен для случая годовых колебаний температуры поверхности водонасыщенного грунта, находящегося в контакте с атмосферой. Описано явление формирования приповерхностного пузырькового горизонта вследствие колебаний температуры [1, 2]. Разработана аналитическая теория данного явления. Установлено, что для многокомпонентных растворов в системе возникает диффузионный пограничный слой, который невозможен для однокомпонентных растворов. Построено аналитическое описание диффузионного слоя и найдены эффективные граничные условия для задачи диффузионного транспорта за его пределами. Аналитические результаты хорошо согласуются с результатами численного счета.

Работы выполнены в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

Литература

- [1] Goldobin D. S., Krauzin P. V. Formation of bubbly horizon in liquid-saturated porous medium by surface temperature oscillation // Physical Review E. – 2015. – Vol. 92, No. 6. – P. 063032.
[2] Голдобин Д. С., Долматова А. В. Повышенное насыщение жидкости в пористой среде атмосферными газами за счет колебаний температуры поверхности // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 454–471.

ФОРМАЛИЗМ ПСЕВДОКУМУЛЯНТОВ И НЕЛОРЕНЦЕВСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Голдобин Д.С.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Denis.Goldobin@gmail.com, lyudmilaklimenko@gmail.com

Распределение Лоренца является вторым (после распределения Гаусса) альфа-устойчивым распределением, имеющим простой аналитический вид. Распределение Лоренца появляется в результате самоорганизации во многих задачах статистической физики. Это вполне естественно, поскольку, например, для случайных переменных на окружности (углов или фаз колебаний) свернутое распределение Лоренца играет роль, подобную роли распределения Гаусса в Центральной предельной теореме для переменных на бесконечной прямой. Кроме того, при построении моделей самосогласованного среднего поля для ансамблей с гетерогенностью параметров, в литературе эти параметры часто полагаются распределенными по Лоренцу. Это позволяет использовать Теорему о вычетах и получать алгебраические уравнения для среднего поля, вместо интегральных. Также для ряда задач статистической физики точные аналитические решения получены только в частном случае распределения Лоренца (например, модель Ллойда для локализации Андерсона в трехмерии). Для многих из перечисленных ситуаций проблема построения теории возмущений, описывающей отклонение от лоренцева распределения, не решена.

В работе [1] предлагается формализм псевдокумулянтов, позволяющий конструировать макроскопическое описание для ситуаций, нарушающих лоренцевость распределения. В частности, в рамках формализма оказывается возможным учесть влияние внутреннего гауссова шума на коллективную динамику ансамблей квадратичных нейронов–пороговых интеграторов (QIF). Применение подхода также иллюстрируется на примере локализации Андерсона в одномерии, когда дельтакоррелированный потенциал является альфа-устойчивой случайной величиной.

Работы выполнены в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

Литература

[1] Goldobin D. S., di Volo M., Torcini A. Reduction Methodology for Fluctuation Driven Population Dynamics // Physical Review Letters. – 2021. – Vol. 127, Iss. 3. – P. 038301.

ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Голдобин Д.С.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}, Самойлова А.Е.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
denis.goldobin@gmail.com, annsomeoil@gmail.com

На сегодняшний день общей чертой для работ по моделированию процессов формирования природных газогидратных депозитов и ассоциированного с ними газового горизонта является то, что механические параметры системы в них считаются заданными и определяются из некоторых независимых источников. Таким же образом задается и скорость восходящего фильтрационного потока, которая критическим образом сказывается на мощности гидратного депозита и может приводить к невозможности его формирования. Будучи чрезвычайно малой, эта скорость не может быть измерена явно, а определяется, фактически, из процедур подгонки. Вместе с тем, пространственная неоднородность параметров донных отложений должна приводить к возникновению ползущего фильтрационного течения в них. Хотя задачи возбуждения термоконвективных течений в пористых средах достаточно хорошо исследованы, для донных отложений, несущих гидратные депозиты, оказываются актуальны граничные условия, являющиеся экзотическими с точки зрения математики.

В данной работе предполагается построение обобщенной гидродинамической модели формирования природных депозитов гидрата. Вычисление этих условий производится по измеряемым данным пористости отложений, карт глубины водных тел и карт геотермального теплопотока. Рассматривается задача о крупномасштабном ползущем течении в слое с медленной пространственной вариацией параметров. Граничные условия при этом оказываются экзотическими с точки зрения того, что хорошо исследовано в механике сплошных сред, но естественными для донных отложений.

Богатые органикой донные отложения формируются в зонах интенсивного осаждения пород (как, например, хребет Блейк (Blake Ridge)). Для таких областей типична проницаемость отложений и отсутствие выраженных гидроизолирующих слоев. Для задачи о тепловой конвекции в отложениях указанные свойства позволяют предполагать на верхней границе изотермические граничные условия и отсутствие горизонтальной компоненты градиента давления. Первое связано с тем, что теплоперенос в пористой среде существенно менее эффективен, чем в водном теле, и уместно полагать, что температура придонных вод (и поверхности донных отложений) определяется некоторыми независимыми факторами. Другими словами, для процессов в донных отложениях температуру поверхности следует считать навязанной, что математически соответствует изотермическому граничному условию. Второе граничное условие - отсутствие горизонтальной компоненты градиента давления - связано с «открытостью» пористого массива. Горизонтальные производные давления в пористом массиве и свободной жидкости над ним должны быть равны в силу непрерывности поля давления. При этом для заметного горизонтального течения в пористой среде потребуется величина градиента, которая в свободной жидкости бы вызвала чрезвычайно сильное течение. Таким образом, конечность возможных течений в свободной жидкости требует исчезающе слабой горизонтальной скорости течения в пористом массиве вдоль его открытой поверхности. Математически это означает нулевую производную давления вдоль поверхности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОМЫВКЕ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ ШТАНГИ

Гольцов Е.С.¹, Труфанова Н.М.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

evgeny.goltsov@yandex.ru, trufanova@pstu.ru

Основной проблемой, возникающей при эксплуатации нефтедобывающих скважин, является образование асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) на поверхности глубинно-насосного оборудования (ГНО). При этом происходят преждевременные отказы насосного оборудования и остановки скважин, сопровождающиеся уменьшением добычи нефти. Наиболее экономически и технологически целесообразным способом борьбы с осложнениями являются промывки скважин теплоносителем. В качестве теплоносителя (агента) выступают горячая нефть и пресная вода. В практике эксплуатации штанговых глубинных насосов (ШГН) актуальным становится вопрос проведения тепловых обработок через полые штанги без остановки скважины. В настоящее время накоплен теоретический материал и промысловый опыт проведения обратных промывок скважин с подачей теплоносителя в затрубное пространство, однако системных представлений об эффективности промывок через полые штанги не представлено. В данной работе рассмотрен вопрос оценки теплового состояния скважины в процессе тепловой обработки через полые штанги и определения наиболее оптимальных условий удаления АСПО.

Поставленная задача решалась численно, методом конечных элементов с учетом модели турбулентного теплопереноса (уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу) [1-2]. Взаимодействие продукции скважины и теплоносителя описывалось уравнением конвекции-диффузии. В работе учитывалась естественная конвекция. Задачи решались стационарные, теплофизические свойства твёрдых материалов не зависели от температуры, бесконечный массив земли заменен ограниченной областью, нефтяная жидкость рассматривалась как многофазная среда. Инженерные расчеты выполнены в программном продукте ANSYS Fluent.

В работе показано как эффективность тепловой обработки нефтяной скважины теплоносителем через полые штанги глубинного насоса зависит от параметров подачи теплоносителя. Получена оценка влияния расхода и температуры теплоносителя на распределение температуры в столбе скважины.

Литература

[1] Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л., Романюк С. Н. Методы решения одномерной радиальной задачи теплопередачи в окружающие скважину мерзлые породы – Тюмень, 2014. – 19 с.

[2] Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well – Chicago, 2012. – 1006 p.

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ ЧАСТИЧНО НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Гончаров М.М.¹, Макарихин И.Ю.¹, Голдобин А.А.¹, Сафарян К.А.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
goncharov.m.m@mail.ru

В проведенном исследовании изучены при различных значениях эксцентриситеты цилиндров конвективные структуры в полости, заполненной несжимаемой жидкостью (Рисунок 1 а). Поверхность внешнего цилиндра находится при фиксированной температуре T_0 , соответствующей температуре окружающей среды. При этом на одной половине внутреннего цилиндра поддерживалась некоторая постоянная температура T_i , другая же половина считалась теплоизолированной. Результаты исследования получены методом конечных элементов в двумерной постановке в приближении Буссинеска.

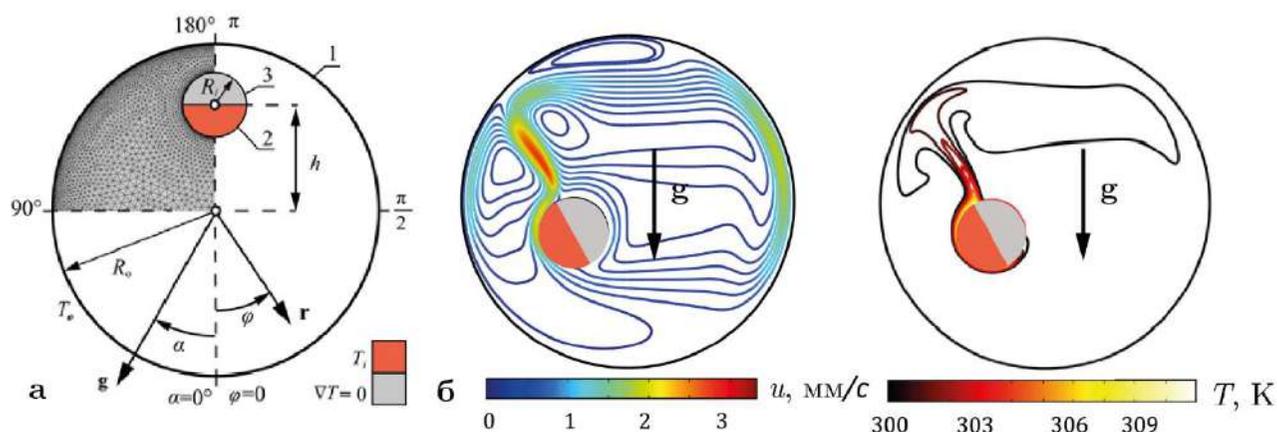


Рисунок 1: Схема расчетной области (а), линии тока и изотермы при угле наклона $\alpha = 120^\circ$, числе Релея $Ra=2 \cdot 10^6$ и относительном смещении 0.6 (б)

Отмечено, что структура температурного и скоростных полей при смещении на величину меньше половины максимального зазора качественно не отличается от картин, соответствующих случаю коаксиальных цилиндров (Рисунок 2 б). При большом смещении изменение угла приводило к существенной смене режима течения, возникающей ввиду близости нагревателя к стенкам. Зафиксированные особенности ярко проявляются в зависимостях интегральных тепловых характеристик. Так, анализируя контурный график безразмерного суммарного теплопотока на внешней границе полости от числа Релея и угла наклона, было замечено варьирование угла с минимальным Нуссельтом от 60° до 100° при различных смещениях нагревателя.

Результаты приведенного исследования могут быть использованы в проектировании электронных систем с компактными источниками тепла в замкнутых полостях [1], а также в системах охлаждения [2].

Литература

- [1] Goncharov Matvey Maksimovich, Safarayn Karen Araratovich, Burkova Ekaterina Nikolaevna and Ogleznev Andrey Alekseevich Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders//Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.
 [2] Gibanov N. S., Sheremet M. A. Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations // Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – Т. 7. – С. 138-145.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В УЗКОМ СЛОЕ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ДВУМЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ КОАКСИАЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ С ЧАСТИЧНЫМ НАГРЕВОМ ВНУТРЕННЕГО

Гончаров М.М.¹, Макарихин И.Ю.¹, Голдобин А.А.¹, Сафарян К.А.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
goncharov.m.m@mail.ru

В проведенном исследовании экспериментально изучены ориентационные эффекты в узкой ячейке, полость которой образована частично нагретыми коаксиальными цилиндрами (Рисунок 1 а). В качестве рабочей жидкости выступала вода. Внешний и внутренний цилиндры были изготовлены из меди и пластика соответственно. Одна из половин внутреннего цилиндра представляла собой нагреватель, созданный путем заполнения полости нихромовой нитью и термопастой и герметизацией слоем меди. Для обеспечения фиксированного перепада температур ячейка помещалась в резервуар с жидкостью. Температура нагревателя поддерживалась с помощью ПИД регулятора.

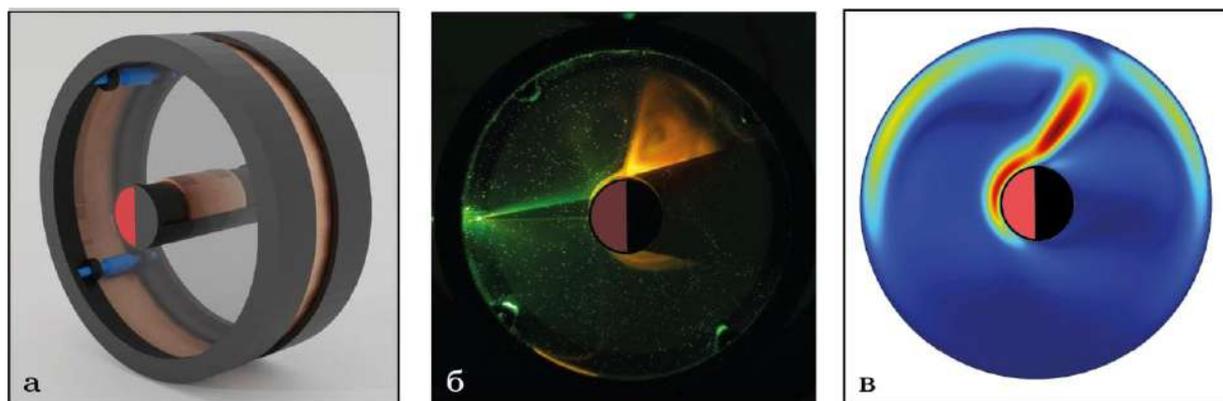


Рисунок 1. а) Вид экспериментальной ячейки. Качественное совпадение картин линий тока при угле наклона $\alpha = 90^\circ$, числе Релея $Ra = 2 \cdot 10^6$, полученных в эксперименте(б) и расчете(в)

В работе получены скоростные поля с помощью флуоресцирующего красителя, в качестве которого использовался родамин. Зарегистрированные конвективные структуры качественно совпадают с результатами расчётов (Рисунок 1 б, в), опубликованных в статье [1]. Слабый изгиб конвективного факела в эксперименте связан с действием сил трения на фронтальной и тыльной стенке, которые не учитывались в расчётах.

Были получены зависимости угла наклона факела от угла ориентации нагревателя при различной толщине ячейки.

Литература

[1] Goncharov Matvey Maksimovich, Safarayn Karen Araratovich, Burkova Ekaterina Nikolaevna and Ogleznev Andrey Alekseevich Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders – Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.

ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ J-ИНТЕГРАЛА ДЛЯ ТЕЛ С ТРЕЩИНОЙ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Гордеев А.Н.¹, Савиковский А.В.¹, Антонова О.В.¹, Михайлов А.А.¹, Семенов А.С.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
gordeevan@gmail.com, savikovskii.artem@yandex.ru, antonova_ov@spbstu.ru,
michailov@compmechlab.com, semenov.artem@googlemail.com

Температурные нагрузки являются одной из распространенных причин возникновения и роста трещин в различных элементах конструкций объектов энергетического и общего машиностроения, которые, в свою очередь, оказывают влияние на работоспособность важнейших объектов инфраструктуры. Поэтому очень важно используя современные подходы математического моделирования и вычислительной механики дать оценку J-интегралу [1-3], одному из ключевых параметров механики разрушения [4]. Характер рассматриваемого температурного воздействия варьируется от линейного распределения температуры в классической задаче механики разрушения - задаче Вилсона [5] до сложного нелинейного распределения температуры, определяющегося особенностями протекающих физических процессов

В данной работе авторами были изучены особенности вычисления J-интеграла для различных вариантов температурного нагружения на примере тел с краевой и центральной трещинами. Рассматривался изотропный материал с различными распределениями температуры. Численное моделирование проводилось в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS [7] с использованием пользовательских процедур. В ходе исследования была проведена оценка влияния типа и формы конечных элементов, характера распределения теплового поля на значения J-интеграла.

Литература

- [1] Cherepanov, G.P.: The Propagation of Cracks in a Continuous Medium. Journal of Applied Mathematics and Mechanic, Vol 31, pp. 503-512, 1967
- [2] Rice J.R. "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, vol. 35, pp. 379-386, 1968
- [3] Nikishkov G.P., Atluri S.N. "An equivalent domain integral method for computing crack-tip integral parameters in non-elastic, thermo-mechanical fracture", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 26. No. 6, pp. 851- 867, 1987
- [4] Качанов Л.М. Основы механики разрушения М.: Наука, 1974. -312 с.
- [5] Wilson W.K., Yu I.-W. "The use of the J-integral in thermal stress crack problems", International Journal of Fracture, Vol. 15, No. 4, August 1979
- [6] Семенов, А. С. Методы расчетного определения скорости роста трещин усталости, ползучести и термоусталости в поли- и монокристаллических лопатках ГТУ / А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Л. Б. Гецов // Проблемы прочности. – 2015. – № 2. – С. 61-87
- [7] ANSYS, Inc. Release Notes, Release 17 – SAS IP, Inc.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА КОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ КАЧЕНИИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

Горячева И.Г., Мещерякова А.Р.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
goryache@ipmnet.ru, mif-almira@yandex.ru*

Использование смазок в узлах трения качения является одним из способов снижения износа поверхностей. Смазочные материалы могут быть нанесены на взаимодействующие поверхности в трибосопряжениях как непосредственно перед их эксплуатацией, так и образовываться в результате самосмазывания поверхностей контактирующих тел при фрикционном взаимодействии [1]. Для обеспечения самосмазывания трибосопряжений на их поверхности наносятся специальные покрытия. Наличие таких покрытий оказывает влияние на контактные характеристики сопряжений. В работе приводится обзор разработанных моделей контактного взаимодействия трибосопряжений, работающих в условиях трения качения с проскальзыванием при наличии тонкого покрытия или промежуточного слоя.

При качении область контакта состоит из подобластей проскальзывания и сцепления, границы которых заранее неизвестны. Предполагается, что тело качения и полупространство имеют одинаковые упругие свойства. Механические свойства поверхностного слоя в нормальном и касательном направлениях описываются моделью Ишлинского. Для нахождения контактного давления применяется метод полос [2], расчёт контактного касательного напряжения проводится с помощью вариационного метода [3]. Исследуется влияние толщины и механических характеристик материала покрытия и коэффициента трения на распределение контактных нормального и касательного напряжений при разных величинах относительного проскальзывания.

В работе приведены результаты моделирования эффекта самосмазывания при фрикционном взаимодействии на примере многокомпонентных алюминиевых сплавов [4]. Разработанная ранее модель основана на анализе распределения внутренних напряжений и температуры в сплаве на макроуровне и позволяет рассчитать количество и состав образовавшейся пленки на поверхности контактирующих поверхностей за счёт упругого и пластического деформирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-49-02010.

Литература

- [1] Kurbatkin I.I., Bushe N.A., Goryacheva I.G., Zaichikov A.V. Influence of antifriction aluminium alloy composition on protected film formation in contact interaction // *Frict. Wear.* – 2006. V. 27.
- [2] Haines D.J., Ollerton E. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – 1963. – V. 177. – P. 95–114.
- [3] Гольдштейн Р.В., Зазовский А.Ф., Спектор А.А., Федоренко Р.П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // *Успехи Механики.* – 1982. – Т. 5. – С. 60–102.
- [4] Маховская Ю.Ю., Горячева И.Г. Моделирование выделения мягкой фазы на поверхность многокомпонентного алюминиевого сплава при трении // *Физическая Мезомеханика.* – 2016. – Т. 19. – С. 15–23.

ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ

Грибов Д.С., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gribovds@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Разработка моделей для описания процессов термомеханической обработки металлов и сплавов – актуальная задача механики деформируемого тела. Физико-механические свойства сплавов и рабочие характеристики изделий из них определяются главным образом мезо- и микроструктурой материалов. В настоящее время активно развиваются подходы к моделированию [1], позволяющие явным образом описывать изменение структуры материалов на различных структурно-масштабных уровнях. Интерес представляет описание сложного циклического нагружения ряда материалов, в ходе которого может происходить дополнительное (по сравнению с простым) упрочнение, достигающее десятков процентов [2]. Целью исследования являлась разработка подмодели для описания эволюции дефектной субструктуры при исследовании упругопластического деформирования поликристаллических металлов и сплавов при произвольных (в том числе – сложных циклических) нагружениях, встраиваемого в существующую двухуровневую модель (деформирование в которой описано сдвигами на системах скольжения). Разработанная статистическая модель позволяет исследовать эволюцию плотностей дислокаций двух знаков на системах скольжения, источников дислокаций и барьеров на расщепленных дислокациях; учтены процессы образования новых дислокаций, аннигиляции дислокаций разных знаков и образование барьеров Ломера–Коттрелла и Хирта. Пластические деформации в модели определяются с использованием уравнения Орована по средним скоростям движения дислокаций и их плотностям. Закон упрочнения учитывает вклады от сопротивления решётки (величина, зависящая только от температуры), от накопленных дислокаций и образованных на расщеплённых дислокациях барьеров. Для определения составляющей, описывающей влияние накопленных дефектов, было оценено влияние величины взаимодействия дислокаций с дислокациями и дислокаций с барьерами.

Для определения параметров модели была проведена процедура идентификации с использованием данных натуральных экспериментов на простое и сложное циклическое деформирование для материалов с различной величиной энергии дефекта упаковки. Проведён ряд численных экспериментов по простым и сложным циклическим траекториям деформации макрообразцов из стали, меди, латуни. Представлены данные об изменении плотностей дефектов в зависимости от вида нагружения и величины энергии дефекта упаковки. Особое внимание уделено интенсивности образования барьеров на расщеплённых дислокациях в материалах с различной энергией дефекта упаковки, а также оценке интенсивности работы систем скольжения в зависимости от типа нагружения. Показано, что с уменьшением величины энергии дефекта упаковки и увеличением «сложности» программы нагружения возрастает интенсивность образования барьеров дислокационной природы, что ведет к увеличению предела пластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 20-79-10235).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т.14, №4. – С. 17-28.
[2] Doquet V., Pineau A. Extra hardening due to cyclic non-proportional loading of an austenitic stainless steel // Scripta Metallurgica et Materialia. – 1990. – Vol. 24. – Iss. 3. – P.433-438.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ КРУЧЕНИЯ НА ЗАКРИТИЧЕСКУЮ СТАДИЮ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВОЛОКНИСТОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Гурджиев А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gurd_20@mail.ru, cem_tretyakov@mail.ru, wildemann@pstu.ru*

В реальных условиях эксплуатации элементы конструкций подвержены действию внешних нагрузок разной природы, которые могут действовать как по отдельности, так и совместно. Материал может вести себя по-разному в зависимости от действующих нагрузок и их комбинаций. Рассмотрим вид воздействий на пластинчатый образец заданной геометрии посредством одноосного нагружения с дополнительными вибрациями кручения. В результате чего сможем сделать выводы о вкладе дополнительных вибраций на процесс разрушения материала в виде зарождения и равновесного роста трещины. Подобные исследования проводились на цилиндрических образцах в работе [1], а исследования по моделированию пластинчатых образцов с концентраторами с учётом «закритики» в [2].

Цель работы: определение закономерности влияния дополнительных вибраций, как частный случай комплексных воздействий, на деформирование и разрушение образцов из ПКМ.

Объект исследования: Полимерный стеклотекстолит марки СТЭФ в виде пластинчатых образцов с V-образными краевыми концентраторами для реализации моды деформирования поперечного сдвига при кручении. Механические свойства материала взяты из [3].

Испытательное оборудование: Разрывная испытательная машина INSTRON 8850.

Методика проведения испытаний: Испытания были проведены на восьми образцах с одинаковой геометрией из одного материала. На группе образцов предварительно выращивалась усталостная трещина. Основной вид воздействия – одноосное растяжение.

Рассматривали влияние начальной предварительно выращенной усталостной трещины, наличия дополнительных вибраций, а также изменение значений амплитуды и частоты этих вибраций на протяжённость ниспадающего участка диаграммы нагружения, по протяжённости которого можно судить о безопасности разрушения и степени стабилизации равновесной трещины.

Заключение: Было рассмотрено влияние начальной усталостной трещины, дополнительных вибраций, а также повышения амплитуды и частоты вибраций на безопасность разрушения и стабилизацию устойчивого роста трещины. В результате определено, что присутствие начальной трещины, обеспечивает стабилизацию её устойчивого роста, а дополнительные вибрации повышают уровень безопасности разрушения, но лишь при малых частотах и амплитудах.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00765).

Литература

- [1] Староверов О.А., Струнгарь Е.М., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Особенности экспериментальных исследований трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния – Пермь, 2017. – № 51. – С. 104-114.
- [2] Вильдеман В. Э., Третьяков М. П., Мугатаров А. И. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала, Пермь, 2020. – № 3. – С. 32-40.
- [3] Жихарев М. В. Влияние предварительного нагружения на баллистические свойства стеклопластиковых панелей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 82-90.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗОНАХ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Гусев Г.Н., Барях А.А., Шардаков И.Н.

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь
gusev.g@icmm.ru, bar@mi-perm.ru, shardakov@icmm.ru

Строительство и эксплуатация различных инженерных и строительных сооружений на подрабатываемых территориях требует решения большого числа технически сложных задач. Это связано с тем, что разработка пластов полезных ископаемых может вызывать значительные деформации в вышележащем грунтовом массиве и провоцировать опасные, и даже катастрофические деформационные процессы в объектах, расположенных на этой территории [1-3]. Методики оценки НДС здания во взаимодействии с фундаментом и окружающим грунтовым основанием, приведенные в нормативной литературе [4], устанавливают некоторые правила, позволяющие при проектировании сооружений учитывать имеющиеся техногенные процессы в грунтовом массиве, либо требуют проведения специальных мероприятий в том случае, если контролируемые деформационные характеристики здания превышают предельные значения. Однако довольно часто оказывается, что уже существующее сооружение было спроектировано без учета этих факторов, а изменившееся состояние окружающей среды заставляет оценивать возможности его эксплуатации исходя из накопленных к настоящему моменту деформационных процессов как в самом здании, так и в грунтовом массиве. Выполнение настоящей работы мотивировано необходимостью оценки безопасной эксплуатации большого массива жилых домов и других строительных объектов, расположенных в городе Березники [5], находящемся на территории Верхнекамского месторождения калийных руд. На протяжении длительного времени отдельные участки городской территории подвергались значительным просадкам, а в 2007–2018 гг. было зарегистрировано возникновение нескольких провалов грунта в зоне городской застройки. В настоящем исследовании на основе результатов численного моделирования в рамках упругости и упруго-пластичности осуществлена оценка допустимых и предельных деформаций грунта для широкого многообразия строительных конструкций. За параметры предельного деформирования грунта приняты те значения линейных деформаций грунта в окрестности здания, при которых в значимых конструктивных элементах здания достигается предельное деформирование. Установлена зависимость предельных характеристик грунта от условий контакта фундамента с грунтом.

Литература

- [1] Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Результаты многолетних наблюдений неравномерных осадок зданий, находящихся на территории Верхнекамского калийного месторождения в г. Березники // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 3(67). – С. 80-89.
- [2] Глебов С.В. Геофизическое обеспечение разработки Верхнекамского месторождения солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 9. – С. 89-92.
- [3] Михайленко А.Н. Ретроспективный анализ результатов сейсморазведочных исследований на шахтном поле БКПРУ-1 ОАО "Уралкалий" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 7. – С. 362-365.
- [4] Указания по допустимым условиям подработки эксплуатируемых зданий и сооружений на Верхнекамском месторождении калийных солей. – С.- Петербург, 2008 г.
- [5] Gusev G., Shardakov I. Research and prediction of the stress-strain state of construction facilities in the undermined territories // Procedia Structural Integrity. – 2021. – Vol. 37. – P. 425-430.

ЗАДАЧА О ДИНАМИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ИМПУЛЬСНОЕ ЛОКАЛИЗОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Гусев Г.Н., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь

gusev.g@icmm.ru, glot@icmm.ru, epin.v@icmm.ru, flower@icmm.ru, shardakov@icmm.ru,
shap@icmm.ru

Одним из основных средств, обеспечивающих безопасность эксплуатации уникальных инженерных и строительных сооружений, является разработка и использование автоматизированных систем мониторинга деформационных процессов, учитывающих все индивидуальные особенности конструкции и условия ее эксплуатации [1-5]. Одним из принципиально важных качеств предлагаемого варианта систем мониторинга, в данной работе, отличающего её от большинства других систем, является автоматизированное внешнее механическое воздействие на элементы конструкции в заданном режиме, что позволит надежно контролировать состояние конструкции и осуществлять прогноз развития предкритического и критического деформационного состояния в ней. Аппаратная часть системы мониторинга реализуется за счет действия систем актуаторов различного типа, распределенных по элементам конструкции необходимым образом. В работе представлены результаты решения задачи о динамическом отклике железобетонной конструкции на импульсное локализованное воздействие, как некий прообраз описанной выше системы. Уровень этого воздействия соответствовал упругому деформированию элементов конструкции. Анализ результатов численного моделирования позволил сформировать виброграммы ускорений отклика в различных точках элементов конструкции для каждого импульсного воздействия. Для каждой полученной виброграммы были сформированы фурье-образы и вейвлет-образы. Вся совокупность полученных численных результатов определила вибропортрет конструкции. Было сформировано два вибропортрета – для конструкции без дефектов и для конструкции с дефектом в виде трещин, сформированных при упруго-пластическом деформировании. Приведены результаты сопоставления этих двух вибро портретов с целью: определения норм, позволяющих устанавливать масштаб и локацию дефектов. Анализ численных результатов этой работы позволит, в частности, определить наиболее рациональную схему расположения и тип датчиков для фиксации предкритического и критического состояния конструкции.

Литература

- [1] Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. – 2015. – № 12. – С. 92-105.
- [2] Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А. и др. «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Строительные науки. – 2018. – № 4. – С. 94-108.
- [3] Хиллер Б., Сухов И.В., Ли В.Т Автоматизированная система деформационного мониторинга на Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерная защита. – 2014 – №4. – С. 36-43
- [4] Loupos K., Damigos Y., Amditis A. et al. Structural health monitoring system for bridges based on skin-like sensor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.236. – P. 012100.
- [5] Comisua C.-C., Taranu N., Voaca G., Scutaru M.-C. Structural health monitoring system of bridge // Procedia Engineering. – 2017. – V. 199. – P. 2054–2059

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ КРЕПЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ДАТЧИКА К ГРУНТУ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Гусев Г.Н., Епин В.В., Корепанов В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

gusev.g@icmm.ru, epin.v@icmm.ru, kvv@icmm.ru, flower@icmm.ru, shardakov@icmm.ru,
shap@icmm.ru

Окружающие нас объекты находятся в движении и взаимодействии друг с другом. В результате этих механических взаимодействий возникают волновые процессы или вибрация. Здания и сооружения подвергаются воздействию вибрации от различных источников, вызванных деятельностью человека, например, от железнодорожного транспорта, метро, строительных и технологических машин. Такая вибрация может нанести ущерб конструкциям или уменьшить их ресурс. Анализ параметров вибрационных процессов важен для оценки деформационных характеристик этих объектов и прогноза их развития. Для качественного измерения волновых процессов требуется не только применение точного (прецизионного) оборудования, но и его надежный контакт с объектом исследования, который бы обеспечивал передачу механических колебаний среды в чувствительный элемент датчика.

Одним из интересных и сложных для исследования объектов является грунт. Его особенностями являются невысокий модуль упругости, разброс механических свойств, изменения свойств под действием окружающей среды. Эти факторы порождают сложности для обеспечения надежного контакта грунта с датчиком. Методики крепления датчика к грунту различаются по способу установки. Это может быть установка датчика на заколоченный стержень, закапывание датчика в грунт, установка в предварительно пробуренную скважину, установка на пластину на поверхность грунта (ГОСТ Р 53964-2010). В многих работах применяются различные способы измерения вибрации и закрепления датчиков, однако сравнения разных методик не производятся.

Особенностью грунтов на большей части территории в России является существенное изменение их свойств в зимний период, вызванных промерзанием, что также влияет на характер вибраций. Это создает проблемы при креплении датчиков по ГОСТу, так как существуют трудности с заглублением датчика на необходимую глубину, бурением скважины или возникают проблемы с заколачиванием стержня для датчика в грунт. Для оперативного проведения работ по оценке уровня вибраций предложены и исследованы несколько способов крепления вибрационных датчиков к мерзлому грунту.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ МОДЕЛЬНЫХ ГРУПП ЗДАНИЙ

Дектерев Д.А., Мешкова В.Д.

Сибирский федеральный университет, Красноярск
dekterev_da@mail.ru, redel-vd@yandex.ru

Изучение аэродинамики городской среды является важной задачей, как с точки зрения обоснования конкретных архитектурных решений, так и с точки зрения формирования комфортных условий для существования человека. Взаимодействие ветровых потоков с элементами застройки приводит к образованию зон с повышенными ветровыми нагрузками и наоборот – застойных зон, значительно сказывающихся на аэрации жилого пространства [1].

Возможны различные подходы в исследовании: натурный эксперимент, лабораторный эксперимент, численное моделирование [2]. Натурный эксперимент сложен в силу неоднозначности начальных условий и отсутствия практической возможности одновременной фиксации данных во множестве точек. Лабораторный эксперимент позволяет учесть эти недостатки, однако накладывается ряд других ограничений, связанных, в первую очередь, с вопросом масштабирования условий и, во вторую, с допущениями при создании аэродинамических моделей. Наиболее комплексным подходом может выделиться численное моделирование, позволяющее рассматривать задачи различных масштабов с одновременным контролем множества параметров. Тем не менее, для того, чтобы говорить о валидности расчетов, должна быть проведена предварительная настройка численных моделей на основе верификационных данных, которые и могут быть получены при натуральных и лабораторных экспериментах.

В данной работе представляются результаты лабораторного эксперимента в аэродинамической трубе Сибирского федерального университета с использованием скоростной видеосъемки и метода цифровой трассерной визуализации PIV (particle image velocimetry) [3]. В качестве аэродинамических моделей применяются оптически прозрачные макеты групп зданий, от парного расположения до масштаба микрорайона. Характерные числа Рейнольдса лежат в диапазоне $Re = 1-10 \times 10^4$, в то время, как натуральные числа находятся в диапазоне $Re = 1-2 \times 10^6$. Тем не менее, как показывает оценка автомодельности задачи, характерные картины течения близки друг к другу. Двухмерные поля скорости и ее пульсаций, получаемые в ходе эксперимента, позволяют проводить оценки образования повышенных и пониженных ветровых нагрузок, являющимися одним из критериев оценки пешеходной комфортности, кроме того представляют собой данные для верификации численных моделей [4].

Дальнейшие эксперименты направлены на более детальное изучение масштабного фактора, а также на изучение особенностей аэродинамики различных морфотипов городской застройки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Литература

- [1] Blocken B. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment / Blocken B., Stathopoulos T., J.P.A.J. van Beeck // Building and Environment. – 2016. – 100. – P. 50-81
- [2] Barlow J. F. Scalar fluxes from urban street canyons. Part 1: laboratory simulation / Barlow J. F. // Bound.-Layer Meteor. – 2004. – 113. – 4. – P 369-385.
- [3] Meshkova V. D. et al. Experimental studies of the formation of zones resulted from air flow around a system of model buildings // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2150. – №. 1. – С. 012030
- [4] Дектерев А.А. и др. Расчетное исследование аэродинамической комфортности и экологической ситуации в городской среде // Город, пригодный для жизни. – 2022. – С. 19-25.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИОННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ПРОТОНИРОВАНИИ НИОБАТА ЛИТИЯ

Демин В.А., Петухов М.И., Пономарев Р.С.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
demin@psu.ru*

В работе предлагается математическая модель, позволяющая описать процессы, сопровождающие проникновение протонов в кристалл ниобата лития при его взаимодействии с расплавом бензойной кислоты. Технология протонного обмена реализуется при температурах ~ 500 К, достаточной для возникновения диссоциации молекул бензойной кислоты при их соударении с кристаллической решеткой подложки и образованием протона и бензоат-иона [1,2]. Освободившиеся протоны проникают в объем кристалла, в котором замещают собой литий [3]. Параллельно данному процессу происходит выход ионов лития из подложки обратно в бензойную кислоту. Таким образом, в ответ на протонирование подложки имеет место проникновение положительно- и отрицательно-заряженных ионов в кислоту.

Для описания динамики образования ионного пограничного слоя вблизи поверхности ниобата лития в математическую модель, построенную на базе сплошнородного подхода, включены уравнения переноса ионов обоих знаков в бензойной кислоте, уравнения электростатики, а также уравнение Навье-Стокса. Помимо этого производится учет рекомбинации указанных ионов и описывается образование нейтрально-заряженных молекул бензоата лития, динамика которых подчиняется отдельному уравнению переноса.

Результаты численного моделирования показывают процесс установления стационарных распределений концентрации ионов лития, присутствующих всюду из-за большой диффузии, и бензоат-ионов с характерным экспоненциальным профилем, свидетельствующим о наличии пограничного слоя. Из-за больших различий в кинетике ионов внутри пограничного слоя возникает электрическое поле. Результаты расчетов в установившемся режиме рекомбинации дают поля концентрации и потенциала, однородные вдоль поверхности кристалла, что свидетельствует об отсутствии конвективного массопереноса при рассматриваемых условиях.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 121101300016-2).

Литература

- [1] Jackel J.L., Rice C.E., Veselka J.J. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO₃ // Appl. Phys. Lett. – 1982 – V.41, 607.
- [2] Kuneva M. Optical waveguides obtained via proton exchange technology in LiNbO₃ and LiTaO₃ – a short review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. – 2016. – Vol. 2, Issue 6. – P. 40-50
- [3] Vohra S.T., Mickelson A.R., Asher S.E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed LiNbO₃ channel waveguides // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 66. – P. 5161-5174.

ТЕОРИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ВРАЩЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ КАПЛИ

Денисова И.В.¹, Солонников В.А.²

¹ *Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург*

² *Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН,
С.-Петербург*

denisovairinavlad@gmail.com, vasolonnik@gmail.com

Исследуется равномерно вращающаяся конечная масса, состоящая из двух несмешивающихся вязких несжимаемых самогравитирующих жидкостей. Это движение описывается задачей с неизвестными границами для системы Навье-Стокса с массовыми силами и градиентом ньютоновского потенциала в правых частях. Поверхность раздела жидкостей считается замкнутой. Поверхностное натяжение действует как на границу раздела, так и на внешнюю свободную поверхность.

В работе рассматривается проблема устойчивости вращения изолированной жидкой массы вокруг неподвижной оси. Такими задачами занимались многие выдающиеся математики. Так, например, А.М. Ляпунов предложил анализировать устойчивость фигур равновесия вращающейся жидкой массы без поверхностного натяжения аналитическими методами [1]. Он исследовал вторую вариацию функционала энергии относительно малых возмущений границы фигуры. Положительность этой вариации гарантирует устойчивость системы, поскольку в этом состоянии её энергия имеет минимум. Метод Ляпунова был обобщён на случай вращающейся капиллярной однофазной жидкости одним из авторов. Мы применяем эту технику для анализа устойчивости вращения конечной массы двухфазной жидкости. Мы рассматриваем эту задачу в случае, когда неизвестная граница близка к границе раздела фигуры равновесия. Существование фигур равновесия в двухфазном случае было получено в [2].

Исследование задачи проводится в пространствах Гёльдера [3]. Доказывается устойчивость вращающейся двухфазной капли с самогравитацией при достаточной малости начальных данных, угловой скорости и экспоненциально убывающих массовых сил, а также положительности второй вариации функционала энергии. Доказательство основано на анализе малых возмущений состояния равновесия вращающейся двухслойной жидкости. В результате делается вывод, что возмущение осесимметричной фигуры равновесия экспоненциально стремится к нулю при неограниченном возрастании времени t , при этом движение капли переходит во вращение жидкой массы как твёрдого тела. Аналогичный результат в пространствах Соболева-Слободецкого был получен в [4, 5].

Литература

- [1] Ляпунов А.М. Об устойчивости эллипсоидальных форм равновесия вращающейся жидкости. – Спб.: Издание АН, 1884 (Собр. сочин., т. 3, АН СССР, М., 1959. -- С. 5--113).
- [2] Солонников В.А. Задача о нестационарном движении двух вязких несжимаемых жидкостей // Проб. мат. анализа. – 2006. – Т. 34. – С.103–121.
- [3] Denisova I.V., Solonnikov V.A. Hoelder Space Theory for Rotation Problem of Two-Phase Drop // Mathematics. – 2022. – V. 10, Is. 24. – P. 4799.
- [4] Denisova I.V., Solonnikov V.A. Stability of the rotation of a two-phase drop with self-gravity // Зап. научн. семин. ПОМИ. – 2021. – V. 508. – С. 89–123.
- [5] Denisova I.V., Solonnikov V.A. Rotation Problem for a Two-Phase Drop // J. Math. Fluid Mech. – 2022. – V. 24(2). – P. 40.

ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПАВ КАПЛЕЙ ИЗ ЕГО ОДНОРОДНОГО РАСТВОРА

Денисова М.О., Костарев К.Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mod@icmm.ru, kostarev@icmm.ru

Диспергирование жидких реакционноспособных систем является одним из перспективных путей повышения эффективности химического производства. Увеличение площади контакта реагентов резко повышает скорость образования конечного продукта реакции без значительного роста стоимости его производства. Для любого технологического процесса, оптимизация диспергирования и последующей химической реакции зависит не только от конструкции диспергатора, но и от следующих важных параметров. К таким относятся тип реакции, физико-химических свойств базовых жидкостей и растворенных в них реагентов, концентрации последних, размеров капель, особенностей массообмена между каплей и окружающей средой, включая гидродинамику участвующих систем жидкостей.

С целью изучения массообмена при жидкостной экстракции экспериментально исследован процесс поглощения каплей поверхностно-активного вещества (ПАВ) из его однородного раствора. Путем подбора контактирующих жидкостей реализован случай, при котором достигаемая концентрация ПАВ в капле многократно превышает его начальную концентрацию в окружающей среде. Благодаря гравитации в капле формируется значительный градиент концентрации, который приводит к развитию конвекции Марангони несмотря на отсутствие внешнего градиента. Визуализация структуры течений и полей концентрации в капле и окружающей среде позволила проследить их эволюцию и определить условия возникновения колебательного режима массообмена. Описаны и объяснены особенности характера осциллирующей концентрационной конвекции в капле. Изучено изменение концентрации ПАВ и его вертикального распределения в капле в зависимости от ее диаметра, начального содержания ПАВ в окружающей жидкости и времени с момента создания капли. Показано, что конвекция Марангони существенно интенсифицирует процесс экстракции ПАВ, причем оптимальное время экстракции достигается в момент совпадения вкладов гравитационного и капиллярного механизмов движения жидкости в процесс массообмена в капле, что характеризуется формированием максимального вертикального градиента концентрации ПАВ в капле.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 19-11-00133-П.

МЕХАНИКА ПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ И ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

Денисюк Е.Я.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
denisyuk@icmm.ru

Полимерные гели – это сетчатые полимеры, содержащие в своем составе жидкость (растворитель), объем которой может многократно превышать исходный объем «сухого» полимера. Наличие растворенной в полимере жидкости оказывает существенное влияние на деформационное поведение геля [1,2]. В частности, внешние механические нагрузки способны порождать миграцию растворителя и его перераспределение внутри материала. При этом, достаточно большие сжимающие нагрузки могут вызывать выделение части жидкости из геля во внешнюю среду [3, 4].

В данной работе рассмотрены краевые задачи, описывающие различные режимы деформирования полимерных гелей и показана их связь с классическими задачами теории упругости. Гель рассматривается как аддитивная несжимаемая смесь, представляющая собой несжимаемый упругий материал и растворенную в нем несжимаемую жидкость. Приближение несжимаемости смеси означает, что объем геля при фиксированной концентрации растворителя не зависит от приложенных механических нагрузок, а объемные деформации могут возникать только за счет поглощения или выделения растворителя. В исходном виде задача о равновесии геля формулируется как задача минимизации функционала свободной энергии системы «полимер – растворитель» и потенциальной энергии приложенных сил. Приближение несжимаемости смеси и условия массообмена с внешней средой учитываются с помощью дополнительных соотношений, которые представляют собой налагаемые на систему двустороннее и одностороннее ограничения. Уравнения, описывающие состояние равновесия геля, получены как уравнения Эйлера – Лагранжа задачи минимизации с помощью метода множителей Лагранжа. Вследствие этого в уравнениях в качестве дополнительных неизвестных появляются два лагранжевых множителя: гидростатическое давление и равновесное значение химического потенциала растворителя. Показано, что различные условия массообмена геля с внешней средой приводят к различным типам краевых задач, описывающих напряженно-деформированное состояние геля. В частности показано, при каких условиях достигается полная аналогия между задачами механики полимерных гелей и задачами теории упругости, а в каких случаях возникают значительные отличия, которые проявляются в виде необычных граничных условий и дополнительных ограничений. Общая теория проиллюстрирована на примере решения модельной задачи, описывающей деформирование плоского слоя геля под действием приложенных сил.

Литература

- [1] Денисюк Е.Я. Механика и термодинамика высокоэластичных материалов, насыщенных жидкостью // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2010, № 1.– С. 118–138.
- [2] Денисюк Е.Я. Механика и термодинамика деформирования насыщенных жидкостью упругих материалов в приближении малых деформаций // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2018, №2.– С. 54–69.
- [3] Денисюк Е.Я. Задачи механики полимерных гелей с односторонними ограничениями // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2022, № 2.– С. 106–123
- [4] Денисюк Е.Я. Равновесие полимерных гелей в поле массовых сил // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2022. № 4.– С. 3–24.

МЕХАНИКА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Дмитриев С.В.^{1,2}, Ильгамов М.А.³, Павлов И.С.², Савин А.В.⁴

¹*Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, г. Уфа*

²*НИИ машиностроения РАН - филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород*

³*Институт механики УФИЦ РАН, г. Уфа*

⁴*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва*

dmitriev.sergey.v@gmail.com

В докладе будут представлены результаты исследований авторов последних лет в области изучения механики и нелинейной динамики углеродных наноматериалов. В частности, будут рассмотрены изгибные колебания углеродных нанотрубок (УНТ), ауксетические свойства и отрицательный коэффициент теплового расширения пучка УНТ, ротобризеры в пучке УНТ, ударные волны сжатия в пучке УНТ, скрученные углеродные наноленты, рулоны углеродных нанолент и обмотки УНТ углеродными нанолентами, рипплекции на поверхности графита, возможность герметизации нано- и микротрещин многослойным графеном, структура и механические свойства трехмерного молекулярного кристалла кубена.

Работа была поддержана грантом Российского Научного Фонда № 21-19-00813.

НЕЙРОСЕТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ БАЛОК ЭЙЛЕРА-БЕРНУЛЛИ

Добриян В.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов
dobriy88@yandex.ru

В работе изучена возможность предсказания колебаний с помощью обученной нейросети на основе колебаний балок Эйлера-Бернулли. Для решения задачи была использована трёхслойная нейронная сеть прямого распространения со скрытым слоем нейронов, разработанная автором доклада и описанная в работе [1]. Возможность предсказания была ранее продемонстрирована в работе [2], однако, влияние различных параметров осталось за её рамками. В данной работе изучалось влияние различных условий на точность краткосрочных прогнозов колебаний балки: использование различных функций активации нейронов скрытого слоя, количество нейронов в скрытом слое нейросети, степень хаотичности колебаний балки. В качестве функций активации использовались функции косинуса и гиперболического тангенса. Количество нейронов в скрытом слое варьировалось от 6 до 21. Рассматривались гармонические, двух- и трёхчастотные колебания балки. На основании 1000 измерений делался прогноз динамики для следующих 50 точек. Было показано, что наибольшее влияние на точность предсказаний имеет уровень хаотичности сигнала, с ростом хаотичности сигнала заметно снижается точность предсказаний. Меньшее влияние на точность оказывает количество нейронов в скрытом слое.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-71-10083, <https://rscf.ru/project/22-71-10083/#!>

Литература

- [1] Awrejcewicz, J.; Krysko, A.V.; Erofeev, N.P.; Dobriyan, V.; Barulina, M.A.; Krysko, V.A. Quantifying Chaos by Various Computational Methods. Part 1: Simple Systems.// Entropy 2018, 20, 175.
[2] Yaroshenko T., Krysko D., Dobriian V., Zhigalov M., Vos H., Vandenabeele P., Krysko A.V. Wavelet modeling and prediction of the stability of states: The Roman Empire and the European Union.// Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015, 26.

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ГЕЛЕЙ ТИПА “CORE-SHELL”

Добросердова А.Б.¹, Пьянзина Е.С.¹, Канторович С.С.²

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²University of Vienna, Wien, Austria

alla.dobroserdova@urfu.ru

Новый класс магнитных мягких материалов представляют системы, сочетающие магнитные частицы нано- и/или микроразмера и полимерную матрицу [1–2]. Между магнитными взаимодействиями и деформацией полимерной матрицы таких материалов есть характерная связь, которая делает их очень перспективными для различных технологических применений, таких как адаптивные демпфирующие устройства, виброгасители, искусственные мышцы и многие другие [3].

В исследовании рассмотрены магнитные гели типа «core-shell» («ядро-оболочка»). Ядро геля моделируется шестью полимерами, каждый из которых состоит из 100 сферических частиц, связанных между собой посредством взаимодействия FENE (Finite Extension Nonlinear Expander). Полимеры сшиваются в 100 точках с помощью классического гармонического потенциала. Короткодействующее отталкивание между частицами описывается потенциалом Вика-Чендлера-Андерсена. Оболочка геля создается из 100 полимеров, которые крепятся к самым удаленным от центра ядра частицам с помощью классического гармонического потенциала. Рассмотрены две различные длины полимеров в оболочке: 10 или 20 сферических частиц. В работе рассмотрены два типа магнитных гелей: магнитным является только ядро (10% сферических частиц ядра заменяются магнитными), магнитными являются и ядро, и оболочка (10% частиц ядра и 10% частиц оболочки заменяются магнитными). Взаимодействия между магнитными частицами описываются магнитным диполь-дипольным потенциалом.

Исследование выполнено посредством компьютерного моделирования методом молекулярной динамики, которое проводилось в программной среде ESPResSo [4], которая представляет собой пакет программ для исследования физических, химических и молекулярно-биологических систем. Компьютерное моделирование проведено как без учета внешнего магнитного поля, так и в его присутствии. В результате проведения исследования получены профили плотности частиц в магнитном геле каждой топологии, найдена вероятность нахождения магнитных соседей у каждой магнитной частицы, радиусы гирации магнитного геля. В случае нулевого магнитного поля также вычислена начальная магнитная восприимчивость.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00209. Компьютерное моделирование реализовано на кластере Уральского федерального университета и кластере VSC-4 (г. Вена, Австрия).

Литература

- [1]. Filipcsei G. Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites / G. Filipcsei // Oligomers – Polymer Composites – Molecular Imprinting / G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilágyi, and M. Zrínyi. – Berlin, 2007. – PP. 137–189.
- [2]. Odenbach S. Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials / S. Odenbach // Arch. Appl. Mech. – 2016. – Vol. 86. – PP. 269–279.
- [3]. Carlson J. D. MR fluid, foam and elastomer devices / J. D. Carlson J.D. and M. R. Jolly // Mechatronics. – 2000. – Vol. 10. – PP. 555–569.
- [4]. <https://espressomd.org/>

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЭКЗОПРОТЕЗОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Д.А. Долгих¹, М.А. Ташкинов¹, В.В. Зильбершмидт²

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

² *Университет Лафборо, Лафборо*

dolgikhdar@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru, V.Silberschmidt@lboro.ac.uk

Современные проблемы в области ортопедии требуют применения передовых технологий для создания экзопротезов конечностей. Ортопедическая гильза является важной составляющей экзопротеза, во многом именно функциональные возможности протеза отвечают за скорость восстановления пациентов. Гильза протеза нижней конечности обеспечивает соединение между телом и протезом, её цель - эффективная интеграция протеза как функционального продолжения тела. Основная трудность при разработке конструкции ортопедической гильзы заключается в том, что оценка ее механических свойств затрудняется тем, что прочностные испытания гильз, как индивидуальных изделий, не входят в стандартный протокол испытаний. Кроме того, необходимо учитывать не только геометрию культы, но и взаимодействие протеза с мягкими тканями. Для достижения удовлетворительной посадки гильзы применяется субъективный подход. Минимизировать трудоемкость процесса возможно за счет предварительного численного моделирования, а также при помощи использования современных производственных технологий. Технологии аддитивного производства (АП, также известные как 3D-печать) успешно используются в качестве эффективных способов изготовления биомедицинских изделий со сложной трехмерной архитектурой, включая имплантаты и экзопротезы. Сочетание методов АП с подходами численного моделирования может послужить основой новой методологии для создания ортопедических гильз со свойствами, адаптированными к потребностям конкретных пациентов.

Целью работы, является изучение механики структурированных композитов для достижения возможности перераспределения давления путем управления внутренней архитектурой протеза. Данная работа посвящена численному исследованию механического поведения гильзы ортопедического экзопротеза, изготовленного методом аддитивного производства из различных типов полимерной матрицы с внедренными углеродными волокнами. В ходе исследования также особое внимание уделяется взаимодействию между протезом и мышечной тканью. Ожидается, что полученные результаты позволят проектировать экзопротезы, сочетающие персонализированную архитектуру, достигнутую благодаря возможностям 3D-печати, и улучшенные механические свойства за счет использования непрерывных волокон.

Проектирование и моделирование гильзы выполнено в рамках в рамках гранта, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-578 от 31.05.2021г. Исследование позиционирования углеродных волокон выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350).

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСУДИСТЫХ И МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ САХАРНОГО ДИАБЕТА

Дрёмин В.В.

Орловский Государственный Университет имени И.С. Тургенева, Орёл
dremin_viktor@mail.ru

Распространенность осложнений сахарного диабета является серьезной проблемой здравоохранения во всем мире, сопряженной со значительными экономическими издержками. Таким образом, своевременная диагностика осложнений и профилактика их развития может способствовать увеличению продолжительности и качества жизни пациентов, а также снижению экономических затрат на их лечение [1]. Методы биофотоники представляют собой современное решение этой проблемы. Различные технологии спектроскопии и визуализации могут предоставить информацию об оптических свойствах биологических тканей, которые напрямую связаны с их кровоснабжением, степенью насыщения кислородом и наличием различных хромофоров. Биофотоника предоставляет уникальные возможности как для структурного, так и для функционального анализа биологических тканей, а также для ранней и неинвазивной диагностики и мониторинга эффективности терапии при различных заболеваниях.

На сегодняшний день оптические технологии находят ряд применений в научных исследованиях и непосредственной клинической практике: видеокапилляроскопия, методы динамического рассеяния света (лазерная доплеровская флоуметрия и визуализация, лазерная спекл-контрастная визуализация), спектроскопия диффузного отражения и визуализация, флуоресцентная спектроскопия и визуализация, оптическая когерентная томография, терагерцовая спектроскопия, конфокальная микроскопия и др [2,3].

В данной работе представлен краткий обзор современных оптических методов диагностики осложнений сахарного диабета, а также представлены оригинальные результаты клинических испытаний мультимодального подхода для анализа кровоснабжения и насыщения тканей кислородом, структурных изменений коллагена в коже и др. Также будут продемонстрированы алгоритмы обработки данных, основанные на методах машинного обучения и спектрального анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-75-10088.

Литература

- [1] IDF Diabetes Atlas. 10th edition, International Diabetes Federation, 2021.
- [2] Zharkikh E., Dremin V., Zherebtsov E., Dunaev A., Meglinski I. Biophotonics methods for functional monitoring of complications of diabetes mellitus // J. Biophotonics. – 2020. – V.13(10) – e202000203.
- [3] Biomedical photonics for diabetes research/ edited by Dunaev A., Tuchin V. – CRC Press, 2022. – 287 p.

ВРЕМЕНА РЕЛАКСАЦИИ СВЯЗАННЫХ ДИФФУЗИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДЕ С МИКРОСТРУКТУРОЙ

Дудин Д.С.¹, Келлер И.Э.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
dmitryovj@yandex.ru, kie@icmm.ru

В работе рассматривается модель связанных вязкоупругих процессов и процессов взаимной диффузии, протекающих в металлических сплавах с изменяющейся микроструктурой, для которой определяется спектр времен релаксации. Модель позволяет описать с феноменологической точки зрения сложные физические процессы, возникающие при интенсивных пластических деформациях бикомпонентного металлического материала. В частности, связанность физических и механических процессов определяет скорость процессов распада твердых растворов при интенсивных пластических деформациях, которая характеризуется коэффициентом диффузии, на много порядков превышающим коэффициент концентрационной диффузии [1]. Деформации материала сопровождаются значительным измельчением размера зерна, что отражается в изменении эффективных кинетических коэффициентов. Работа основана на модели [2], в которой элементарные объёмы сплошной среды принимаются за маркеры, относительно которых записываются законы диффузии. Маркерный способ описания позволяет вводить независимые диффузионные потоки и идентифицировать коэффициенты диффузии компонент из эксперимента Киркендалла. Другие подходы к изучению связанных процессов взаимной диффузии и реологии были рассмотрены в нашей работе [3]. Упругие и вязкие деформации рассматриваются в рамках схемы сдвигового сжатия, а скорость изменения скалярной переменной, характеризующей микроструктуру, определяется потоком микроструктуры и её объемным производством. Связность процессов обеспечивается с помощью термодинамических и кинетических коэффициентов, а также конвективной скорости, зависимой от диффузионного массопереноса и реологии. Поставлена одномерная модельная задача о кручении стержня, ограниченного по бокам и свободного с торцов. Применение к ней метода возмущений позволило получить эффективные коэффициенты диффузии и вязкости, характеризующие скорость релаксации связанных процессов. Нелинейная постановка обладает однородным стационарным решением, в окрестности которого производились возмущения полевых переменных. Это приводит к задаче на собственные значения, которая решается с помощью средств компьютерной алгебры. В длинноволновом и коротковолновом приближениях релаксация возмущений характеризуется спектром эффективных коэффициентов диффузии и вязкости. Один из полученных коэффициентов диффузии способен значительно увеличиваться при изменении термодинамических и кинетических коэффициентов, определяющих влияние микроструктуры, что может объяснить аномально быструю диффузию компонентов сплава при интенсивных пластических деформациях.

Литература

- [1] Brassart, L., Liu, Q., Suo, Z. Mixing by shear, dilation, swap, and diffusion. *J. Mech. Phys. Solids*, 2018, vol. 112, pp. 253-272
- [2] Дудин Д.С., Келлер И.Э. Обзор подходов к формулировке связанных моделей взаимной диффузии в вязкоупругом теле. *Химическая физика и мезоскопия*, 2022, т. 24, № 3, с. 296-311
- [3] Straumal, B.B., Baretzky, B., Mazilkin, A.A., et al. Formation of nanograined structure and decomposition of supersaturated solid solution during high pressure torsion of Al-Zn and Al-Mg alloys. *Acta Mater.*, 2004, vol. 52, iss. 15, pp. 4469-4478

МЕТОД АДГЕЗИВОВ ПРИ СОЗДАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ НАНО-ПЛАСТИНОК ЖЕРМЕН-ЛАГРАНЖА

Дунченкин П.В.¹, Яковлева Т.В.¹

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов
dunchenkin.pasha@yandex.ru, yan-tan1987@mail.ru

Построена математическая модель оптимизации формы нано-пластин, соединенных адгезивным слоем, находящихся под действием сдвиговых механических нагрузок. Нано-эффекты прямоугольных пластин Жермен-Лагранжа учитываются на основе модифицированной моментной теории упругости [1,2]. Соединение нано-пластин осуществляется с помощью адгезии. Численное решение прямых задач получено методом конечных элементов, процесс оптимизации проводился на основе метода RAMP [3]. Методология топологической оптимизации, разработанная авторами, заключающаяся в поиске минимальных пиковых значений сдвиговых напряжений за счет модификации структуры соединяемых адгезивным слоем элементов при сохранении заданного количества моделирующего материала. Проведено исследование сходимости численных результатов методом конечных элементов. Исследована оптимизация припоя для нескольких типовых соединений, и геометрии их расположения нано-пластин. Получены практически точные решения. Данная работа является обобщением ранее полученных результатов [4,5].

Численные результаты оптимизации припоя приведены для нескольких типов соединений, их расположения и геометрии пластин. Полученные результаты показывают надежность и точность предложенного авторами подхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-71-10083.

Литература

- [1] Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C., Tong, P.: Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *Int. J. Solids Struct.* 39(10), 2731–2743 (2002)
- [2] Fan, Fan, et al. "Modified couple stress-based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally graded microplates using NURBS-based isogeometric approach." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 372 (2020): 113400
- [3] *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1838, 8th annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering (MSEE 2020) 20-21 November, 2020, Chengdu, Sichuan, China Citation Jian Xing and Longfei Qie 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1838 012067
- [4] Krysko, A.V., Awrejcewicz, J., Dunchenkin, P.V., Zhigalov, M.V., Krysko, V.A. (2022). Topological Optimization of Multilayer Structural Elements of MEMS/NEMS Resonators with an Adhesive Layer Subjected to Mechanical Loads. In: Altenbach, H., Bauer, S., Eremeyev, V.A., Mikhasev, G.I., Morozov, N.F. (eds) *Recent Approaches in the Theory of Plates and Plate-Like Structures. Advanced Structured Materials*, vol 151. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87185-7_13
- [5] Pavel V. Dunchenkin, Anton V. Krysko, Maxim V. Zhigalov, Vadim A. Krysko, The 1st International Conference on Mathematical Modeling in Mechanics and Engineering, September 8-10, 2022, p. 63, Belgrade, Serbia

УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ЖИДКОСТЬЮ И СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Дьякова В.В.¹, Полежаев Д.А.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

dyakova@pspu.ru, polezhaev@pspu.ru

Экспериментально изучается устойчивость поверхности сыпучей среды во вращающемся горизонтальном цилиндре, заполненном жидкостью. Эксперименты проводятся с частицами одного типа и различными жидкостями. В качестве рабочих жидкостей выбираются такие, что частицы в них имеют отрицательную и положительную плавучесть. Когда плотность частиц больше плотности жидкости, они образуют кольцевой слой вблизи боковой стенки вращающегося цилиндра. Напротив, в более плотной жидкости частицы собираются в цилиндрическое ядро в центре вращающегося цилиндра. Наблюдения показывают, что при очень быстром вращении цилиндра межфазная граница осесимметричная и невозмущенная, но при понижении скорости вращения она испытывает неустойчивость к появлению волн Кельвина – Гельмгольца [1].

Проведено изучение условий возникновения неустойчивости и размеров надкритических структур в зависимости от плотности и вязкости рабочих жидкостей. Сравнение данных, полученных в экспериментах с жидкостями, плотность которых больше или меньше плотности частиц сыпучей среды, показывает, что они хорошо согласуются между собой. Одним из управляющих параметров задачи является безразмерное ускорение Γ , которое представляет собой отношение ускорения свободного падения и центробежного ускорения. Другим управляющим параметром является безразмерный комплекс $(1 - \rho)d/\delta$, здесь ρ – относительная плотность двух сред ($\rho < 1$), d – диаметр частиц, δ – толщина вязкого пограничного слоя Стокса.

Работа поддержана РФФ (грант № 18-71-10053)

Литература

[1] V. Dyakova, D. Polezhaev. Pattern formation on the surface of the granular medium in a horizontal rotating cylinder filled with fluid // Phys. Rev. Fluids. 2022. Vol. 7 (4). 044302.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСЛОВНОЙ ПРИМЕСИ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДСКОГО ЛАНДШАФТА

Евграфова А.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
eav@icmm.ru*

В настоящее время остро стоит вопрос о создании благоприятных климатических условий внутри городской среды. Так, актуальные проблемы городской климатологии связаны с распространением загрязняющих веществ, ветровым комфортом, а также внутренней теплоемкостью городского пространства, которая стремительно изменяется вслед за изменением морфологии застройки. Исследование климатического комфорта часто проводят на основе данных математического моделирования, либо путем анализа спутниковых снимков. Лабораторных исследований, посвященных процессам массообмена в пределах городской геометрии немного. При этом в [1] был реализован новый подход к экспериментальному исследованию процессов теплообмена внутри городского пространства. Этот подход заключается в использовании турбулентных коэффициентов переноса для оценки параметров эксперимента.

В рамках данной работы приближение турбулентных характеристик использовано для лабораторного моделирования процесса распространения тяжелой примеси. Растекание примеси рассмотрено на примере детализированного макета части города Пермь. Макет изготовлен из ABS пластика и с высокой точностью воспроизводит рельеф местности, высоту и расположение зданий на площади почти 5 квадратных километра (масштаб макета 1:4000). Макет помещен в герметичный контейнер, заполненный дистиллированной водой, в качестве примеси использованы водные растворы NaCl массовой концентрации 20%. Исследования проведены для локализованных источников загрязнений, а также для протяженных источников примеси. Показано, что геометрия области расположения источника существенно влияет не только на площадь растекания, но и на длину пути распространения. Открытые поверхности способствуют быстрому снижению концентрации примеси. При этом, здания, препятствуя распространению, аккумулируют примесь.

Исследование выполнено за счет гранта СП-1404.2021.1.

Литература

[1] Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // Urban Climate. – 2022. – V. 43 – P.101177.

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГОРОДОВ ПЕРМЬ И КРАСНОЯРСК НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Евграфова А.В.¹, Ветров А.Л.²

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
eav@icmm.ru, alvetrov@yandex.ru

Тепловой режим в городе определяет многие технологические, социальные и экономические процессы городской жизни. Наиболее яркое проявление особенностей теплового режима города это остров тепла. Сложная геометрия городских зданий и их взаимного расположения создают трудности в изучении теплового режима приземной городской атмосферы и эволюции острова тепла в частности. Изучение режима температуры воздуха в городах часто проводят на основе данных математического моделирования [1], прямого измерения температуры на городских метеорологических станциях, либо на основе данных о температуре, восстановленной из дистанционных измерений в инфракрасном участке спектра радиометрами на спутниках [2-3]. Однако, в [4] был предложен новый подход, который заключается в лабораторном моделировании процессов теплообмена в условиях городского ландшафта. В качестве объектов был использован детализированный макет центральной части города Пермь. Эксперименты проводились в приближении турбулентных характеристик. Другими словами, масштаб и параметры эксперимента были выбраны так, что число Рэлея ($Ra = g\beta\Delta TL^3/\nu\chi$), рассчитанное для молекулярных коэффициентов вязкости и теплопроводности ($\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\chi = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с), было близко к числу Рэлея, рассчитанному для турбулентных значений вязкости и теплопроводности ($\nu \approx 2-5$ м²/с, $\chi \approx 2-5$ м²/с).

В данной работе проведен анализ применимости приближения турбулентных характеристик в эксперименте к описанию приземной температуры воздуха в атмосфере на примере городов Перми и Красноярска. В качестве данных для анализа использованы спутниковые снимки Landsat 8, 9. Снимки получены для различных скоростей и направлений ветра в период с мая по сентябрь 2022 г. в полуденные часы. Показано соответствие между очагами высоких температур в лабораторной модели и данными дистанционного зондирования с разрешением в 100 м.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098, <https://rscf.ru/project/22-61-00098/>

Литература

- [1] Boris J. The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response // *Computing in Science & Engineering*. – 2002. – V.4(2). – P. 22-32.
- [2] Shreevastava A. et al. Paradoxical impact of sprawling intra-Urban Heat Islets: Reducing mean surface temperatures while enhancing local extremes // *Scientific Reports*. – 2019. – Т. 9, №. 1. – С. 1-10.
- [3] Zhang M. et al. Spatio-temporal evolution of urban thermal environment and its driving factors: Case study of Nanjing, China // *PloS one*. – 2021. – V. 16, №. 5. – С. e0246011.
- [4] Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // *Urban Climate*. – 2022. – V. 43 – P.101177.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ГРАДИЕНТНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР

Еленская Н.В.¹, Виндокуров И.В.¹, Пирогова Ю.В.¹, Ташкинов М.А.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
n.elenskaya@pstu.ru, ivvindokurov@pstu.ru, yu.pirogova@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru,

Активное развитие технологий аддитивного производства (3D-печать) открывает новые возможности для проектирования и производства сложных структур с оптимальными свойствами. Новые системы материалов обладают большим потенциалом в области тканевой инженерии и хирургии, а также в области разработки искусственных органов.—Одной из концепций получения функциональных материалов является создание структурно неоднородных материалов с градиентом свойств. В последние годы значительно возросло использование пористых 3D-печатных функционально-градиентных материалов. В таких материалах изменение механических свойств происходит непрерывно, что позволяет избежать концентрации напряжений, возникающих в структурах со слоистыми градиентами на границе слоев. Важным аспектом градиентных структур является сглаживание градиентов напряжений для избежания концентрации напряжений, вызванной резкими геометрическими изменениями. Отдельной проблемой является сочетание нескольких типов элементарных ячеек, поскольку автоматический переход от одного типа элементарных ячеек к другому не всегда прост.

Данное исследование ориентировано на изучение механического поведения пористых структур из полилактида (PLA) с функциональным градиентом пористости и градиентом разнородности, для генерации которых использовались аналитические выражения трижды периодических минимальных поверхностей. Оценивалось влияние параметров структуры и свойств градиента на механическое поведение решетчатых структур с различными типами градиентов было исследовано при воздействии сжимающих нагрузок. Моделирование сопровождалось экспериментальными исследованиями деформационного поведения аддитивно изготовленных структур, которые были выполнены с использованием бесконтактной системы измерения деформации Micro Vic-3D, позволяющей анализировать пространственное распределение деформаций на микромасштабе. Численные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Получено качественное и количественное совпадение полей деформаций для исследуемых структур. Было проведено сравнение эффективных свойств, определенных экспериментально и численно, расхождение между результатами не превышало 10%. Также исследовано влияние различных типов функционального градиента на механические свойства моделей. Эти результаты могут быть полезны для разработки новых биомедицинских устройств для восстановления и замены поврежденных участков костной ткани.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках гранта, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-578 от 31.05.2021 г.

ВЛИЯНИЕ ПОДМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОДВИЖНЫХ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

Елфимова Е.А.¹, Кузнецов М.А.¹, Русанов М.С.¹ Зверев В.С.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург
Ekaterina.Elfimova@urfu.ru

Исследуются динамические магнитные свойства системы взаимодействующих подвижных магнитных частиц, находящейся под действием переменного и подмагничивающего постоянного магнитных полей. Предполагается, что переменное и постоянное поля коллинеарны оси Oz лабораторной системы координат; ограничения на напряженность полей не накладываются. В рассматриваемой системе реакция магнитных частиц на действие полей происходит только по броуновскому механизму, когда направление магнитного момента меняется за счет вращения тела частицы. Основываясь на численном решении уравнения Фоккера-Планка для плотности вероятности ориентации магнитного момента определены динамическая намагниченность, восприимчивость и времена релаксации магнитных моментов частиц в исследуемой системе. Показано, что магнитный отклик системы формируется под влиянием конкурирующих между собой межчастичного диполь-дипольного взаимодействия и одночастичного взаимодействия магнитного момента с внешними полями. Проанализирован вклад каждого взаимодействия в динамический отклик магнитных частиц и особенности, вносимые подмагничивающим полем в динамическую восприимчивость. Изучено влияние амплитуды переменного поля на магнитный отклик системы. Полученные результаты являются теоретической основой прогнозирования свойств феррожидкостей для их применения в наукоемких промышленных и медико-биологических технологиях.

Исследования проведены в рамках проекта Минобрнауки РФ «Уральский математический центр» соглашение № 075-02-2022-877.

ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Ельтищев В.А., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
eltishchev.v@icmm.ru, losev.g@icmm.ru, mad@icmm.ru

В работе исследован способ определения концентрации примесей в электропроводящих средах с помощью непрямого метода, основанного на измерении электрической проводимости среды. Электропроводность металлов и полупроводников в значительной мере зависит от содержания примесей других элементов [1], поэтому она может быть определена на основе электромагнитных измерений [2, 3]. Для работы с химически активными расплавами жидких металлов наиболее подходит индукционный метод измерений. Он заключается в воздействии на проводящую среду внешними переменными магнитными полями различной частоты. В зависимости от химического состава происходит различное искажение исходного магнитного поля. Измерение и анализ степени искажения при помощи измерительных катушек позволяет установить однозначную связь выходного сигнала датчика и электрической проводимости жидкого металла. Калибровка устройства на средах с известной концентрацией примесей обеспечивает возможность применения датчика для анализа степени чистоты жидких проводящих сред.

Был разработан и изготовлен портативный индукционный датчик электропроводности образцов металлов, представляющий собой систему из трех катушек, расположенных соосно. При пропускании через генерирующую катушку переменного тока создается переменное магнитное поле. Согласно закону электромагнитной индукции, переменное магнитное поле индуцирует электродвижущую силу в измерительных катушках. Если около одной из измерительных катушек находится электропроводящая среда, то из-за возникающих в этой среде вихревых токов будет создаваться встречное переменное магнитное поле. Основываясь на принципе суперпозиции магнитных полей, разность потенциалов в измерительной катушке, расположенной рядом с электропроводящей средой, будет меньше, чем разность потенциалов в противоположной измерительной катушке. В отсутствие проводящей среды потенциалы на обеих катушках эквивалентны. Это явление и используется для определения электропроводности металлов.

Исследованы зависимости выходного сигнала датчика от частоты переменного тока, питающего генерирующую катушку устройства. Также было проведено исследование выходного сигнала датчика на оловянно-свинцовых цилиндрах, в которых присутствовал медный порошок с различной концентрацией от 0 до 10% по массе. Полученные зависимости сигнала датчика от концентрации примеси в цилиндрах демонстрируют работоспособность устройства в такого рода задачах.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Арнольд М.Н., Ивановский М.Н., Субботин В.И., Шматко Б.А. Влияние диссоциирующих и термически прочных газовых примесей на электросопротивление щелочных металлов – Теплофизика высоких температур, 1967. – 812-816 с.
- [2] Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода – Мир, 1965. – 268 с.
- [3] Субботин В.И., Кириллов П.Л., Козлов Ф.А. Очистка натрия от кислорода. Контроль за содержанием кислорода в натрии – Теплофизика высоких температур, 1965. – 154-163 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ КОНТИНУУМА КОССЕРА

Еремеев В.А.

¹ *Университет Кальяри, Кальяри, Италия*

² *Политехника Гданьска, Гданьск, Польша*

eremeyev.victor@gmail.com

В рамках модели континуума Коссера при конечных деформациях рассматриваются деформации решетчатых материалов, образованных несколькими семействами гибких тонких волокон, жестко соединенных в местах соединений таким образом, чтобы углы контакта между разными волокнами в месте соединения не зависели от деформаций. Предложена полудискретная модель, в рамках которой такой материал описывается системой нелинейных уравнений для волокон и для соединений. Последние принимаются абсолютно жесткими, а волокна моделируются в рамках теории кривых Коссера. Таким образом, в полудискретной модели рассматриваются кинематически независимые поля перемещений и поворотов. В качестве эффективной среды естественным образом вводится модель сплошной среды – континуума Коссера. В работе построены уравнения состояния эффективной среды, свойства которой определяются упругими параметрами линий Коссера. Отметим, что материальная симметрия эффективной среды также наследуется от геометрических и упругих свойств решетки волокон. Например, простейший случай решетки, образованной тремя ортогональными семействами волокон, соответствует кубической симметрии. Аналогичным образом получены кинетические уравнения состояния, т.е. выражение для эффективной плотности кинетической энергии и выражений тензоров микроинерции. Рассмотрены различные упрощения тензоров микроинерции. Таким образом, построена полная модель эффективной среды типа Коссера, свойства которой полностью определяются упругими и геометрическими свойствами решетки. Отметим, что в данной среде, вообще говоря, наблюдается связанность волн трансляции и вращения. Обсуждаемые результаты являются развитием [1, 2].

Литература

- [1] Eremeyev V.A. Two-and three-dimensional elastic networks with rigid junctions: modeling within the theory of micropolar shells and solids // *Acta Mechanica*. – 2019. – V.230(11). – P. 3875-3887.
[2] Eremeyev V.A., Reccia E. On dynamics of elastic networks with rigid junctions within nonlinear micro-polar elasticity // *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. – 2022. – V. 20(6). – P. 1-11.

ДВУХЭТАПНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Еремин А.А., Варелджан М.В., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

Кубанский государственный университет, Краснодар
evg@math.kubsu.ru, nvg@math.kubsu.ru, eremin_a_87@mail.ru,
michael.vareldzhan.777@mail.ru

Моделирование процесса возбуждения бегущих волн ультразвуковыми пьезопреобразователями является одной из задач активного волнового мониторинга состояния инженерных конструкций. Для объемных и бегущих волн, возбуждаемых заданной поверхностной нагрузкой в упругом слоистом полупространстве или пакете слоев, имеются явные интегральные и асимптотические представления [1]. Вся информация об источнике колебаний входит в них через вектор-функцию контактных напряжений, поэтому, если она известна, то становятся доступными все преимущества полуаналитического подхода, такие как быстрое определение амплитудно-частотных характеристик возбуждаемых волн и распределение между ними волновой энергии, поступающей от источника.

Исходя из идей работы [2], реализована двухэтапная вычислительная схема. На первом этапе контактная задача о динамическом взаимодействии пьезопреобразователя с упругой подложкой решается методом конечных элементов (МКЭ) с тем, чтобы использовать найденные контактные напряжения в асимптотиках [1]. Однако ввиду негладкости КЭ аппроксимации напряжений, их непосредственная подстановка в асимптотические представления дает неустойчивые результаты. Они стабилизируются, если вектор контактных напряжений находится из граничного интегрального уравнения, в котором найденные с помощью МКЭ смещения входят в правую часть, а ядро определяется матрицей Грина подложки. Для преобразователя произвольной в плане формы его численное решение строится вариационно-разностным методом, причем более устойчивые результаты получаются, если берутся смещения на противоположной стороне волновода.

В докладе обсуждаются особенности практической реализации данного подхода в двумерной и трехмерной постановке, которые иллюстрируются численными примерами возбуждения бегущих волн пленочным пьезоэлектрическим преобразователем, приклеенным к поверхности упругой пластины. Наряду с параметрическим анализом влияния геометрии пьезоэлемента и свойств волновода на амплитудно-частотные и энергетические характеристики возбуждаемых бегущих волн, представлены результаты экспериментальной верификации, подтверждающие адекватность и практическую значимость разработанной схемы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект № FZEN-2020-0017).

Литература

- [1] Бабешко В.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В. Анализ волновых полей, возбуждаемых в упругом стратифицированном полупространстве, поверхностными источниками // Акустический журнал. – 1986. – Т. 32, Вып. 3. – С. 366-371.
- [2] Moulin E., Assaad J., Delevarre C., Osmont D. Modeling of Lamb waves generated by integrated transducers in composite plates using a coupled finite element–normal modes expansion method // J. Acoust. Soc. Am. – 2000. – Vol. 107 (1). – P. 87-94.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДОБЫЧИ ОДНОФАЗНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Ермакова А.С., Пещеренко С.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

ErmakOva.AS@yandex.ru, peshcherenko@yandex.ru

В процессе добычи нефти уменьшается пластовое давление и происходит упругое или неупругое, вплоть до локального разрушения, деформация его скелета. На начальном этапе добычи нефть занимает односвязную область, которая в процессе добычи может разбиваться на ряд островковых залежей. Долгосрочным критерием качества добычи можно, например, считать коэффициент извлечения нефти, краткосрочным – энергоэффективность добычи или объем добычи. Для достижения поставленных целей, нефтяные компании используют модели добычи из месторождения в целом [1]. Существенная часть этих моделей является полуэмпирическими подмоделями элементов системы, таких как пласт, скважина, насосная установка и т.д. Качество работы такой модели будет зависеть от выбора коэффициентов полуэмпирических подмоделей, что делает ее применение трудоемким. Альтернативным подходом к оптимизации работы месторождения является моделирование работы отдельной скважины из первых принципов, на основе законов механики сплошных сред. Влияние соседних скважин может быть учтено через изменение граничных условий для моделируемой скважины и находящегося в ней нефтедобывающего оборудования. Ясно, что такая модель может быть только нестационарной.

Нами предложена система уравнений, состоящая из модели части пласта, прилегающего к скважине, модели течения жидкости в скважине и модели нефтедобывающей установки (УЭЦН). Модель пласта – это уравнение притока жидкости в добывающую скважину. Модель скважины описывает движение жидкости в системе вертикальных труб на основе уравнений Навье-Стокса и непрерывности, осредненных по поперечному сечению труб. Модель насоса – зависимость напора насоса от подачи, полученная обработкой данных стендовых испытаний. Для замыкания системы уравнений использовали уравнение закона сохранения массы жидкости. Решение системы находили численными методами. Пока модель описывает течение однофазной изотермической жидкости и может быть применена для описания нестационарной работы скважин с низким газовым фактором. Граничные условия задаются на основе данных телеметрии.

Модель верифицирована на нефтяных скважинах с обводненностью более 0,9. Были промоделированы случаи выхода на режим (запуск в эксплуатацию заглушенной скважины) и периодическая эксплуатация, когда периоды откачки сменялись периодами накопления, во время которых насосная установка выключается, а столб жидкости удерживается благодаря обратному клапану. В результате расчетов были получены зависимости подачи насоса и динамического уровня от времени. Полученные зависимости повторяли экспериментальные, а точность вычисления не превышала погрешность измерения в эксплуатационных условиях.

Литература

[1] Применение интегрированного моделирования в нефтегазовой отрасли / Е.В. Филиппов, Г.Н. Чумаков, И.Н. Пономарева, Д.А. Мартюшев // Недропользование. – 2020. Т.20 – № 4. – С. 386-400.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ О РАВНОВЕСИИ УПРУГИХ ОРТОТРОПНЫХ ТЕЛ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОЛЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ, И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ГЕОМЕХАНИКИ

Зайцев А. В.¹, Фукалов А. А.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
a-zaitsev@mail.ru, mr_aa@mail.ru

Потребность в решении задач для анизотропных цилиндрических тел, находящихся в равновесии в поле гравитационных сил под действием равномерных и/или неравномерных внутреннего и/или внешнего давлений, обусловлена широким спектром приложений в строительстве и геологии. Примерами могут служить задачи геомеханики хранения и добычи полезных ископаемых и дорожного строительства, при решении которых необходимо учитывать осевую симметрию, естественную анизотропию монолитных крепей горных выработок и облицовок, а также их взаимодействие с окружающими массивами грунтов или осадочных горных пород. Получение новых аналитических решений также важно и актуально для разработки инженерных методов уточненного прочностного анализа, для тестирования численных алгоритмов решения более сложных задач, в которых отдельные элементы конструкций и сооружений имеют аналогичную геометрию и граничные условия, а также для отработки методик эксперимента с тяжелыми телами простейшей геометрии.

Получены новые аналитические решения задач о равновесии полых и составных толстостенных тяжелых ортотропных цилиндров с жестко закрепленной внешней или внутренней поверхностью и находящихся под действием однородного и/или неоднородного внутреннего или внешнего давления [1–4]. Рассмотрены задачи о равновесии тяжелого железобетонного цилиндра, находящегося на грунтовом основании [1]. Площадь контактной поверхности предполагалась известной и неизменной. Реакция основания считалась заданной в виде квадратичной функции, на которую налагалось условие равенства ее интегральной суммы весу конструкции. Это предположение позволило записать граничные условия для определения постоянных интегрирования частного решения, на основе которого были проанализированы распределения полей перемещений и напряжений в поперечных сечениях горизонтальных монолитных железобетонных цилиндров, нижняя половина которых вкопана в грунт, а также проведена многокритериальная оценка начальной прочности этих сооружений.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM–2020–0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг. и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 19–41–590026)

Литература

- [1] Зайцев А.В., Кутергин А.В. Упругое равновесие тяжелого горизонтального толстостенного ортотропного цилиндра, находящегося под действием неравномерно распределенного бокового давления // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2010. – № 4. – С. 36–45.
- [2] Фукалов А.А., Кутергин А.В. Точные аналитические решения задач о равновесии упругих анизотропных тяжелых тел с центральной и осевой симметрией и их приложения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–4. – С. 1831–1833.
- [3] Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кутергин А.В. Фукалов А.А. Распределение напряжений в поперечных сечениях контейнеров из стеклопластика и полимербетона, используемых для длительного хранения высокоагрессивных сред // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14. – № 4–5. – С. 1230–1234.
- [4] Зайцев А.В., Кислицын А.В. Об одном решении задачи Ламе для составного протяженного элемента конструкции, состоящего из посаженных с натягом толстостенного трансверсально-изотропного внешнего цилиндра на соосный изотропный внутренний // Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки. – 2007. – № 1 (14). – С. 164–167.

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ: НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИКРОКРОВОТОКА, ДЕФОРМАЦИЙ БИОТКАНЕЙ И ХАРАКТЕРИЗОВАНИЯ ИХ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Зайцев В.Ю.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
vyuzai@ipfran.ru*

В докладе дается обзор сформировавшихся в последние годы новых для биомедицинской диагностики модальностей на основе оптической когерентной томографии (ОКТ) – оптической когерентной ангиографии (ОКА) и эластографии (ОКЭ), являющихся функциональными «расширениями» ОКТ - технологии визуализации, основанной на принципах низкокогерентной интерферометрии и отметившей в 2021 году тридцатилетие своего развития. С точки зрения разрешения и масштабов визуализируемой области ОКТ занимает нишу между высокоразрешающими методами оптической и атомно-силовой микроскопии и макроскопической визуализацией, обеспечиваемой ультразвуковыми сканерами. Рассматриваются основные принципы ОКА и ОКЭ, появление которых во многом было стимулировано ранее возникшими подобными функциональными расширениями в медицинском ультразвуке. Также приведен ряд результатов, иллюстрирующих ранее недоступные возможности для высокоразрешающей визуализации деформаций различного происхождения, упругих свойств исследуемой среды и микрокровотока. Обсуждаемые ОКТ модальности уже начали активно использоваться для решения широкого круга биомедицинских задач и могут быть также интересны и для других применений.

Исследования поддержаны грантом РФФ № 22-12-00295.

МИКРОСТРУКТУРА И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ДЕНТИНА ЗУБОВ У ПАЦИЕНТОВ ПРЕКЛОННОГО ВОЗРАСТА

Зайцев Д.В.^{1,2}, Куклина А.А.^{1,2}, Меженов М.Е.¹, Панфилов П.Е.^{1,2}

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

² Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург

zaytsev@m.ursmu.ru

Количество обращений за стоматологической помощью у пациентов преклонного возраста заметно увеличивается. При частичной потере твердых тканей зуба, время жизни зуба и качество жизни пациента после реставрации, во многом определяется совместимостью механических свойств реставрационных материалов с тканями зуба. Как правило, для реставрации зубов применяют одни и те же материалы для лиц молодой (18-44 лет), средней (45-59 лет) и пожилой (60-74 лет) возрастной группы. Целью данной работы является оценка микроструктуры и элементного состава дентина человека пожилого возраста в сравнении с дентином человека среднего возраста и оценка изменения микротвердости дентина при склерозировании дентинных каналов. Результаты этой работы позволят оценить вклад дентинных каналов в деформационное поведение композита подобного рода, а также научно обосновать применение реставрационных материалов для лечения пациентов пожилого возраста.

Распиловку зубов проводили вдоль главной оси зуба с помощью алмазной пилы с водным охлаждением, предотвращая перегрев зуба и, как следствие, повреждение его тканей. Далее поверхности реза обрабатывали на полировальном станке с вращающимся алмазным диском при водном охлаждении. Микроструктуру дентина изучали на оптическом и сканирующем электронном микроскопе. Содержание микроэлементов в образцах определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после кислотного вскрытия в блоке чистых помещений (6, 7 классы чистоты) ИГГ УрО РАН. Микроиндентирование по Виккерсу склерозированного и нормального дентина проводили на ПМТ-3.

Показано, что возрастные изменения дентина зубов человека, подобны изменениям дентина при аутоиммунных заболеваниях и проявляется в склерозировании/закрытии дентинных каналов. Эти изменения начинаются в вершине корня зуба и постепенно поднимаются до его коронковой части. В последующем эти изменения могут затронуть и коронковую часть зуба. Эти изменения в микроструктуре дентина видны невооруженным взглядом, дентин становится прозрачным. Прозрачность возникает, когда просветы каналов заполняются минералами, что уменьшает количество рассеянного света от дырок. Предполагается, что увеличение концентрации минералов связано только с закрытием просвета каналов, тогда как межтубочковый дентин не изменяется. Исследования в более чем 50 точках содержания микроэлементов в нормальном дентине и дентине со склерозированными каналами, показало, что существенных различий в химическом составе дентина в этих возрастных группах обнаружено не было. Поэтому можно сказать, что изменение микроструктуры не связано с появлением новых соединений. Проведённое исследование образцов дентина на микротвёрдость показало, что склерозированный дентин немного твёрже нормального (Нормальный дентин: $H_v = (0,71 \pm 0,05)$ ГПа. Склерозированный дентин: $H_v = (0,86 \pm 0,10)$ ГПа.), из чего можно сделать вывод, что катастрофических изменений в прочностных свойствах не происходит и склерозированный дентин можно рассматривать, как основу для дальнейшей реставрации зуба, но нужно учитывать его отличия в прочностных свойствах от нормального дентина.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-29-00268.

РЕГУЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В УЗКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

Засимова М.А., Красикова А.Д.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
zasimova_ma@spbstu.ru

На протяжении многих лет ведутся исследования по управлению потоком жидкости в ограниченных геометрических конфигурациях. Контролируемое изменение структуры течения может увеличить производительность технических устройств. В настоящей работе представляется оценка возможностей управления струйным потоком за счет впрыска массы сравнительно низкорасходной регулирующей струи в область распространения основной струи. Постановка задачи соответствует условиям эксперимента [1].

Рассматривается прямоугольная полость $(4 \times 58.5 \times 25)$ см³. Одна торцевая поверхность полости (4×25) см² открыта. Через центр противоположной поверхности (твердой стенки) в полость выдвинута цилиндрическая трубка внутренним диаметром 1.4 см, с помощью которой подается струя воды со средней скоростью 3.75 м/с (число Рейнольдса – 5.4×10^4). На одной из узких вытянутых стенок (4×58.5) см², параллельных оси основной струи, расположены три отверстия диаметром 0.6 см для подачи регулирующих струй. Расстояние между отверстиями – 10 см. Скорость подачи воды варьируется в диапазоне $(0 \dots 6.8)$ м/с, при этом максимальное число Рейнольдса – 4.2×10^4 . Отношения расходов регулирующей и основной струи изменяются от 0 до 0.33, отношения количеств движения – от 0 до 0.6.

Численное моделирование проведено в пакете ANSYS Fluent, обеспечивающем второй порядок точности по времени и пространству. Задача решалась в 3D постановке на основе двух подходов к моделированию турбулентного движения: URANS (решение уравнений Рейнольдса, для замыкания использовалась $k-\epsilon$ RNG модель) и LES (решение отфильтрованных уравнений Навье-Стокса, для замыкания использовалась WMLES S- Ω модель, в которой реализована модифицированная подсеточная модель Смагоринского). В расчетах использовались квазиструктурированные сетки с гексагональными элементами, построенные в пакете ICEM CFD. Размерность сетки в URANS расчетах составила 0.6 млн ячеек, в LES – 10 млн ячеек.

В соответствии с данными [1], в отсутствие регулирующих струй в расчетах воспроизведен нестационарный режим распространения основной струи, частота колебаний которой как в расчетах, так и в эксперименте составила 0.18 Гц. Для осредненного поля скорости проведено сопоставление с данными [1] по профилям скорости вдоль и поперек оси распространения струи: данные расчетов несколько занижают скорость затухания струи. При подаче регулирующих струй происходит перестройка структуры течения и поля давления. С увеличением скорости подачи регулирующих струй частота колебаний основной струи уменьшается и при определенных значениях скорости основная струя прилипает к границе полости, со стороны которой подается регулирующая струя.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-29-00224.

Литература

[1] Lawson N.J., Arruda M.P., Davidson M.R. Control of a submerged jet in a thin rectangular cavity // Journal of Fluids and Structures. – 2005. – Vol. 20. – P. 1025–1042.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАПЛЕСОДЕРЖАЮЩЕЙ СТРУИ ПРИ ОДНОКРАТНОМ КАШЛЕ

Засимова М.А., Рис В.В., Иванов Н.Г., Тихомиров А.Е.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
zasimova_ma@spbstu.ru

Исследование направлено на оценку риска передачи инфекций воздушно-капельным путем. Ключевую роль в данном процессе играют вирусосодержащие капли, образующиеся при выдохе, кашле или чихании инфицированного человека. Острые респираторные явления порождают короткую (длительностью около 0.4 с) импульсную струю, содержащую капли. До сих пор остаются неопределенными оценки характерной области, в которой будут содержаться инфицированные капли и продолжаются споры о том, достаточно ли указанной в рекомендациях ВОЗ безопасной дистанции от окружающих не менее одного метра.

В работе представляются результаты численного моделирования течения, формируемого при однократной импульсной подаче воздуха через круглое отверстие диаметром 2 см в обширное цилиндрическое пространство, внешние границы которого удалены более чем на 50 калибров. В расчетах задавались различные входные распределения скорости от 2.4 до 9.6 м/с, время подачи импульсной струи варьировалось в диапазоне 0.1...0.4 с. Во время подачи импульсной струи из входного отверстия подавались капли воды, диаметр капель варьировался от 4 до 256 мкм. Постановка задачи соответствует [1], где приведены DNS данные моделирования начального этапа движения вихревого облака (до 1.5 с). Численное моделирование выполнено в пакете ANSYS Fluent. Использовались два подхода к моделированию турбулентности: URANS и LES. Моделирование движения капель осуществлялось на основе подхода Лагранжа.

Основное внимание в работе уделяется систематическому описанию свойств и характеристик течения, сформированного вдали от источника распространения импульсной струи. Показано, что в результате импульсной подачи струи, формируется вихревое облако шарообразной формы. Вихревое облако захватывает легкие капли (16 мкм и менее), тяжелые капли под действием силы тяжести быстро осаждаются и примерно за 1 с покидают расчетную область. Профили скорости, построенные в безразмерных координатах в различных сечениях вихревого облака, не изменяются со временем и, кроме того, являются одинаковыми для течений с различными начальными распределениями.

Профили продольной скорости в радиальном сечении вихревого облака сопоставляются с данными для стационарной струи. Профили скорости совпадают на участке высоких скоростей, существенные отличия имеются в области пониженных скоростей – на профиле фиксируется область отрицательных значений продольной скорости, что указывает на формирование вихревого облака. Проанализированы временные эволюции следующих характеристик вихревого облака: значения и положения максимума скорости в облаке, средняя скорость движения облака, эквивалентный радиус облака. Сделаны выводы о корреляциях между этими величинами. Данные расчетов с использованием двух подходов к моделированию турбулентности согласуются между собой и с известными из литературы экспериментальными данными и теоретическими зависимостями.

Литература

[1] Fabregat A., Gisbert F., Vernet A., Dutta S., Mittal K., Pallarès J. Direct numerical simulation of the turbulent flow generated during a violent expiratory event // *Physics of Fluids*. – 2021. – Vol. 33. – P. 1-12.

МАГНИТОГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОЖИДКОСТИ

Зверев В.С., Иванов А.О., Елфимова Е.А.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

vladimir.zverev@urfu.ru

Магнитные жидкости (или феррожидкости) представляют собой стабильные коллоидные суспензии магнитных наночастиц в немагнитной жидкости-носителе. Традиционно исследователи пытаются охарактеризовать наночастицы их размерами [1-2]. Распределение магнитных наночастиц (МНЧ) по их размерам может быть измерено непосредственно с помощью современных экспериментальных методов. Сложность заключается в том, что МНЧ характеризуется несколькими размерами. Так например, магнитная суспензия коллоидно-стерически или электростатически стабилизирована, а это приводит к необходимости учета гидродинамического слоя. С другой стороны, прогнозирование свойств ансамбля МНЧ часто не требует правильной информации о размерах МНЧ, но требует знания некоторых физических характеристик. Говоря о статических магнитных свойствах феррожидкостей, можно утверждать, что правильное описание и прогноз можно получить, зная только распределение МНЧ по их магнитным моментам. Для многих применений динамический магнитный отклик системы более важен, чем статические магнитные свойства. В этом случае основной интерес представляет спектр времен релаксации магнитных моментов частиц. Однако трудность заключается в том, что время релаксации магнитного момента МНП не может быть измерено непосредственно, а только с помощью косвенных экспериментальных методов. Более того, спектр времен релаксации ансамбля МНП с разными размерами отличается от такового для одиночных МНП из-за коллективных эффектов [3].

Магнитная гранулометрия включает численное решение обратной задачи, когда набор экспериментальных точек описывается аналитическим выражением при условии минимизации стандартного отклонения. Основная трудность здесь связана с тем, численный подбор параметров может быть реализован только с ограниченным числом фракций по размерам частиц. Как правило, точный числовой подбор требует большого числа фракций. Это означает, что число «степеней свободы» в численном решении обратной задачи велико, что требует больших вычислительных ресурсов. Кроме того, большое количество «степеней свободы» не обеспечивает высокую точность извлеченных характеристик, поскольку экспериментальные данные обладают погрешностью измерений. Данный доклад посвящен алгоритмам, позволяющим получить распределение по магнитным моментам наночастиц в феррожидкости по данным статической кривой намагниченности и динамической восприимчивости феррожидкости.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Уральский математический центр» № 075-02-2022-877.

Литература

- [1] Lysenko S.N. et al. Preparation and magneto-optical behavior of ferrofluids with anisometric particles // Phys. Scr. – 2020. – Vol. 95, № 4. – P. 044007.
- [2] Lakhtina E.V., Pshenichnikov A.F. Dispersion of magnetic susceptibility and the microstructure of magnetic fluid // Colloid J. – 2006. – Vol. 68, № 3. – P. 294–303.
- [3] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S. Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles // Soft Matter. – 2016. – Vol. 12, № 15. – P. 3507–3513.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ С ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Зверев В.С.¹, Новак Е.В.¹, Пьянзина Е.С.¹, Добросердова А.Б.¹, Иванов А.О.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург
ekateina.novak@urfu.ru

В данной работе исследована система магнитных эллипсоидов вращения с точечным диполем в центре с разной степенью анизотропии формы и положением магнитного момента внутри частицы (параллельно и перпендикулярно главной оси эллипсоида) с помощью компьютерных экспериментов методом молекулярной динамики. Для изучения этой системы используется моделирование методом молекулярной динамики в среде ESPResSo [1]. Для измерения анизотропии формы используется параметр X_0 (отношение главной полуоси к дополнительной). На первом этапе была изучена система, в которой частицы имеют магнитные моменты, но между ними отсутствует диполь-дипольное взаимодействие. В результате были рассчитаны начальная магнитная восприимчивость (магнитная характеристика) и функция радиального распределения (структурная характеристика). Для начальной восприимчивости данные, полученные при компьютерном моделировании, отличаются от ланжевеновской намагниченности (теоретический идеальный случай) в пределах статистической погрешности. Данные для функции радиального распределения также совпадают в пределах погрешности расчета. На следующем этапе изучения магнитных эллипсоидов в системе было включено магнитное взаимодействие и рассмотрена система с ориентацией магнитного момента перпендикулярно главной оси.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030". Расчеты выполнены на кластере Уральского федерального университета.

Литература

[1]. <https://espressomd.org/>

ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА В НЕЛИНЕЙНОЙ И ЛИНЕЙНОЙ РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ КОССЕРА

Зданчук Е.В., Лалин В.В.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет, Санкт-Петербург
zelizaveta@yandex.ru, vllalin@yandex.ru

В работе получены кинематические и динамические условия на поверхности сильного разрыва перемещений и поворотов для задач динамики нелинейной анизотропной редуцированной среды Коссера [1]. При этом под сильным разрывом понимается возможность разрыва первых производных по времени и по пространству в то время, как сама функция остается непрерывной [2].

Из условий на поверхности разрыва для нелинейной задачи получены условия для линейной редуцированной среды Коссера. Показано, что существенными являются только два условия:

$$[\mathbf{n}\dot{\mathbf{u}} + c_n \nabla \mathbf{u}] = 0, [\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} + c_n \rho \dot{\mathbf{u}}] = 0.$$

Здесь квадратными скобками обозначен скачок функции на поверхности разрыва; $\dot{\mathbf{u}}$ – частная производная по времени вектора перемещений; $\boldsymbol{\tau}$ – тензор напряжений; ρ – объемная плотность; c_n – скорость движения поверхности разрыва в направлении нормали к поверхности разрыва \mathbf{n} .

С использованием полученных условий на поверхности разрыва доказаны следующие факты:

1. Доказано, что в линейной среде непрерывность вектора поворота влечет непрерывность всех первых частных производных этого вектора, т.е. сильные разрывы вектора поворота невозможны.
2. Доказано, что поверхность правильных сильных разрывов в линейной среде является характеристической поверхностью [3].
3. Доказана теорема единственности решения задачи динамики для линейной анизотропной редуцированной среды Коссера при наличии поверхностей сильного разрыва.

Литература

- [1] Анисимов А.Е., Зданчук Е.В., Лалин В.В. Поверхность разрыва в анизотропной редуцированной среде Коссера. Теорема единственности для задач динамики с разрывами // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т.84, №1. – С.77-84.
- [2] Петрашень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах – Л.: Наука, 1980.
- [3] Смирнов В.И. Курс высшей математики – М.: Наука, 1974. – 336 с.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕРМОМЕХАНОДИФФУЗИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА НА ВИНКЛЕРОВСКОМ ОСНОВАНИИ

Земсков А.В.^{1,2}, Ле Ван Хао¹

¹Московский авиационный институт (НИИ), Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
Azemskov1975@mail.ru

Неослабевающий интерес к задачам механики связанных полей различной физической природы продиктован широким спектром практических приложений в науке и технике. На сегодняшний день на основе известных уравнений механики сплошных сред, уравнений тепло и массопереноса, уравнений электродинамики и законов термодинамики построены модели, учитывающие взаимное влияние механических, температурных, диффузионных, электромагнитных, химических и пр. полей [1,2].

В работе предлагается модель нестационарных термоупругодиффузионных колебаний ортотропной балки Бернулли-Эйлера, находящейся под действием распределенной поперечной нагрузки. Балка находится на упругом основании, моделью которого является основание Винклера [3]. Математическая постановка задачи представляет собой замкнутую систему уравнений изгиба балки Бернулли-Эйлера с учетом тепломассопереноса, которая получена с помощью обобщенного принципа Даламбера из модели термоупругой диффузии для сплошных сред. При этом учитывается конечная скорость распространения тепловых и диффузионных потоков, обусловленная релаксационными эффектами [4]. Замыкают постановку задачи однородные краевые условия, выражающие условия шарнирного опирания и нулевые начальные условия, означающие отсутствие внутренних возмущений в начальный момент времени.

Решение задачи ищется с помощью метода функций Грина и представляется в виде сверток функций влияния с функциями, задающими нестационарные, распределенные по длине балки возмущения. Для нахождения функций Грина используется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по продольной координате. В результате, исходная система уравнений термоупругодиффузионных колебаний балки приводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье искомых функций в пространстве преобразования Лапласа. Обращение преобразования Лапласа осуществляется с помощью вычетов и таблиц операционного исчисления.

Литература

- [1] Helmut Mehrer, Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes. - Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [2] Marin M., Öchsner A. The effect of a dipolar structure on the Hölder stability in Green–Naghdi thermoelasticity // Continuum Mech. Thermodyn. – 2017. - Vol. 29, pp. 1365–1374.
- [3] Вестяк А.В., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Модель нестационарного изгиба упругодиффузионной балки Бернулли-Эйлера на винклеровском основании // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27, № 1. ISSN: 1029-6670, DOI: 10.33113/mkmc.ras.2021.27.01.110_124.08
- [4] Zemskov A.V., Le Van Hao, Tarlakovskii D.V. Bernoulli-Euler Beam Unsteady Bending Model with Consideration of Heat and Mass Transfer // Journal of Applied and Computational Mechanics – 2023. - Vol. 9, No 1. – P. 168-180. DOI: 10.22055/jacm.2022.40752.3649

ДИНАМИКА ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ С ВЫСОКИМ КОНТРАСТОМ ВЯЗКОСТЕЙ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Зимасова А.Р., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
zimalsu@gmail.com, kozlov@pspu.ru

Экспериментально изучается поведение границы раздела легкой вязкой и тяжелой невязкой жидкостей при неравномерном вращении длинного горизонтального цилиндра. В качестве жидкостей используются пары жидкостей: касторовое масло и вода, глицерин и флоринерт FC-40. В случае второй пары жидкостей глицерин окрашивается родамином, что позволяет с высокой точностью определить границу раздела жидкостей методом фоторегистрации с использованием красного светофильтра и освещении жидкостей лазером зеленого цвета.

В докладе показываются результаты исследования границы раздела жидкостей вблизи торца цилиндрической полости. Эксперименты проводятся в центрифугированном состоянии жидкостей при варьировании скорости вращения, а также амплитуды и частоты либраций. Обнаружено, что с ростом амплитуды либраций при заданной частоте либраций область смачивания легкой жидкостью торца увеличивается. В ходе либраций контактная линия жидкостей на торце полости осциллирует с частотой либраций; амплитуда радиальных колебаний контактной линии возрастает с амплитудой либраций. При достижении определенной амплитуды либраций легкая жидкость полностью покрывает торец полости и переходит на цилиндрическую поверхность в виде горизонтальных вихревых структур по всей поверхности полости.

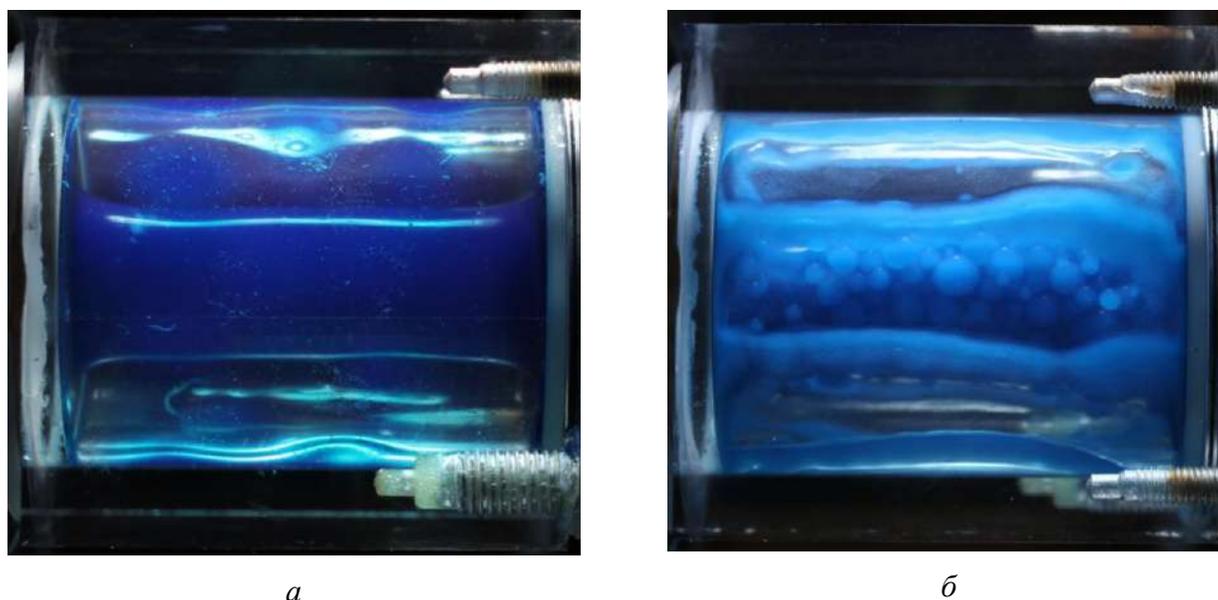


Рисунок 1 – Вид сбоку границы раздела касторового масла и воды при: *a* – $f_{\text{rot}} = 6$ об/сек, $\varepsilon = 0$; *б* – $f_{\text{rot}} = 6$ об/сек, $f_{\text{lib}} = 3$ Гц, $\varepsilon = 0.30$

При заданной скорости вращения полости и заданной амплитуде либраций размеры области смачивания легкой жидкостью торца уменьшаются с увеличением частоты либраций, для полного смачивания торца полости при большей частоте требуются большая амплитуда либраций.

К ТЕОРИИ МАГНИТОВЯЗКОГО ЭФФЕКТА В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ФЕРРОЖИДКОСТЯХ

Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург
a.j.zubarev@urfu.ru, larisa.iskakova@urfu.ru

В [1] приведены результаты экспериментов, показывающие, что эффективная вязкость типичных феррожидкостей под действием магнитного поля при малых скоростях сдвигового течения может возрасти в десятки раз, в то время как классические теории магнитовязкого эффекта, основанные на представлении о феррожидкости, как об «идеальной газе» невзаимодействующих частиц, для исследованных в [1] систем предсказывают увеличение вязкости в пределах десяти процентов. В [1] этот сильный магнитовязкий эффект был качественно объяснен объединением наиболее крупных частиц феррожидкости в цепочечные агрегаты. В работе [2] предложена теоретическая модель этого эффекта, позволившая количественно объяснить сильные магнитовязкие эффекты на основе концепции цепочечных структур.

В работах [3,4] выполнен анализ влияния взаимодействия «мелких» частиц с цепочками из «крупных» частиц бидисперсной феррожидкости. В обеих работах сделан вывод о том, что магнитное взаимодействие «крупных» частиц с «мелкими» делает цепочки более короткими.

В экспериментах [5] этот вывод проверялся на специально приготовленных моно-и бидисперсных феррожидкостях. Результаты показали, что при фиксированной концентрации «крупных» частиц в бидисперсных феррожидкостях магнитовязкий эффект растет с увеличением концентрации «мелких». Этот эффект диаметрально противоположен тому, что ожидается из выводов [3,4] о влиянии «мелких» частиц на длину цепочек.

С целью объяснения этого противоречия нами была развита модель бидисперсной магнитной жидкости с цепочками, состоящими из «крупных» частиц. Учитывалось как магнитное, так и стерическое взаимодействие «крупных» частиц с «мелкими». Показано, что, если магнитное взаимодействие сокращает размер цепочек, то стерические эффекты – увеличивают эту длину. Таким образом, если при взаимодействии «мелких» частиц с «крупными» доминируют магнитные эффекты, следует ожидать снижения магнитовязкого эффекта с ростом концентрации мелких частиц. Если доминируют стерические эффекты – увеличения магнитовязкого эффекта.

Полученные результаты позволили качественно объяснить наблюдавшийся в [5] рост магнитовязкого эффекта при увеличении концентрации «мелких» частиц.

Литература

- [1] Odenbach S. Magnetoviscous Effect in Ferrofluids. - Springer, Berlin, 2002. – 151p.
- [2] Zubarev A.Yu., Fleisher J, Odenbach S. Towards a theory of dynamical properties of polydisperse magnetic fluids: Effect of chain-like aggregates // Physica A. – 2005. – V. 358. – P.475-491.
- [3] Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. Chain-like structures in polydisperse ferrofluids // Physica A. – 2004. – V.335. – P. 314-324.
- [4] Kantorovich S.S. Chain aggregate structure in polydisperse ferrofluids: different applications // J.Magn.Magn.Mater. – 2005. – V.289. – P. 203-206.
- [5] Siebert E., Dupuis V., Neveu S., Odenbach S. Rheological investigation on the theoretically predicted “Poisoning” effect in bidisperse ferrofluids // J.Magn.Magn.Mater. – 2015. – V.374. – P. 44-49

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО МОНИТОРИНГА РЕСПИРАТОРНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Зуев А.Л.¹, Мишланов В.Ю.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет им. академика

Е.А.Вагнера Минздрава России, Пермь

zal@icmm.ru, permmed@hotmail.com

Разработан метод электроимпедансной спирометрии для оценки основных спирометрических медицинских показателей, основанный на регистрации электрического сопротивления (импеданса) проводящих биологических сред в течение дыхательного цикла. В работе проведено экспериментальное моделирование и изучение изменения параметров электрического импеданса гетерофазных (аэрозольных) проводящих сред в модельных лабораторных ячейках. В результате исследования получено подтверждение гипотезы, что основными факторами, влияющими на результаты электроимпедансной спирометрии, являются скорость движения аэрозольных частиц проводящей жидкости в воздушном потоке в крупных дыхательных путях, а также состав бронхиального секрета мелких дыхательных путей. Предложена и обсуждена разработка медицинских сенсорных систем для диагностики респираторных заболеваний в пульмонологии на основе результатов импедансометрической спирометрии.

Вместе с тем, внедрение нового метода в клиническую практику будет более эффективным в случае реализации постоянного удаленного дистанционного мониторинга пациентов с респираторными заболеваниями. Большое количество разрабатываемых сенсоров нуждаются в клинических испытаниях и сертификации в качестве медицинских изделий. Актуальными вопросами внедрения новых сенсорных систем являются точность регистрации биологических параметров, воспроизводимость результата, удобство, осуществимость, применимость методики, наличие инженерной технической поддержки производителя в процессе медицинской эксплуатации, включение в клинические рекомендации. Не менее важным вопросом, влияющим на эффективность клинических испытаний и практическое использование новых технологий, на наш взгляд, является обеспечение доступности клинической информации для врача. Идеология многих производителей сенсоров направлена на конечного потребителя – пациента, который является анализатором полученной медицинской информации, что противоречит принципам оказания медицинской помощи. Нерешенными задачами являются: безопасность передачи электронной информации в офис врача в режиме реального времени, а также формирование медицинского заключения с учетом новых параметров оценки здоровья человека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-415-596008 р_НОЦ_Пермский край).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА СОСТАВА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

Зуев А.Л.^{1,2}, Мишланов В.Ю.³, Криштоп В.В.⁴, Ременникова М.В.^{5,6}, Гаркушин А.А.⁶,
Антипова А.А.^{3,6}, Никитина К.А.², Благин Е.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

³*ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет им. академика
Е.А.Вагнера Минздрава России, Пермь*

⁴*Пермский государственный научно-исследовательский университет, Пермь*

⁵*Пермский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь*

⁶*ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь
zal@icmm.ru, permmed@hotmail.com*

Целью работы является разработка системы высокочувствительных сенсоров для определения малых концентраций биологически активных веществ в конденсате выдыхаемого воздуха для удаленного мониторинга больных с заболеваниями внутренних органов. Поиск и разработка новых сенсорных анализаторов для медицины представляет собой актуальную задачу в связи с развитием методов удаленного мониторинга пациентов, выписанных из медицинских стационаров вследствие различных тяжелых хронических и острых заболеваний, включая случаи коронавирусной инфекции Covid-19. Оценка молекулярного состава конденсата выдыхаемого воздуха является важной задачей для дистанционной диагностики в области персонализированной медицины. Определение концентрации заряженных и электрически нейтральных молекул в растворе методом регистрации электрического импеданса требует построения принципиальной электрической схемы образующейся системы электролита и растворенных в нем молекул диэлектрика. Задачей исследования является определение чувствительность системы к различным химическим примесям и выявление возможности ее использования в диагностике состава газовых смесей, пропускаемых через солевой раствор хлорида натрия.

В качестве тестового исследование проведено изучение характеристик электрического импеданса раствора глюкозы в физиологическом 0,9% растворе. В качестве модельной лабораторной ячейки использована цилиндрическая камера диаметром 40 мм, высотой 24 мм, объемом 30 мл, в которую помещается испытуемый раствор, а также электроды для измерения параметров электрического импеданса в биполярной схеме с использованием RCL-метра АКПП-6109. Используются растворы различной концентрации глюкозы 16,7% (926,9 ммоль/л), 33,3% (1853,9 ммоль/л), 66,7% (3707,8 ммоль/л) в 0,9% растворе NaCl. Полученные результаты показали, что добавление глюкозы к проводящему раствору NaCl приводило к росту модуля импеданса, что объясняется увеличением количества электрически нейтральных молекул глюкозы между ионами натрия и хлора в растворе. Результаты исследования позволяют построить принципиальную схему структуры раствора электролита в зависимости от концентрации добавленного диэлектрика в виде молекул глюкозы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-415-596008 р_НОЦ_Пермский край).

РЕЛАКСАЦИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ФЕРРОЖИДКОСТЯХ

Иванов А.О.¹, Кэмп Ф.Дж.²

¹Уральский математический центр, Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

²Школа химии, Университет Эдинбурга, Эдинбург, Шотландия
Alexey.Ivanov@urfu.ru

Доклад посвящен изучению процесса релаксации намагниченности феррожидкости от состояния полного магнитного насыщения до нуля после выключения намагничивающего поля. В приближении только броуновским механизмом релаксации магнитного момента, динамика этого процесса контролируется тепловым вращением отдельных магнитных наночастиц. При фиксированной температуре и вязкости жидкости-носителя интенсивность соответствующего вращения определяется размерами наночастиц и магнитным диполь-дипольным взаимодействием магнитных моментов наночастиц. В этой работе методом аналитической теории в комбинации с компьютерным моделированием методом броуновской динамики исследуется совместное влияние полидисперсности и межчастичного взаимодействия на релаксацию намагниченности. Теоретический подход базируется на уравнении Фоккера-Планка-Брауна для наночастиц с броуновским механизмом релаксации, межчастичное взаимодействие учитывается в рамках самосогласованного подхода среднего поля. Аналитическая теория предсказывает достаточно неожиданное поведение: на малых временах после начала процесса размагничивания релаксация магнитного момента частицы каждого размера определяется соответствующим броуновским временем релаксации индивидуальных частиц этого размера; однако на больших временах каждая фракция частиц имеет одинаковое эффективное время релаксации, превышающее индивидуальные времена броуновской релаксации. При этом невзаимодействующие наночастицы всегда релаксируют только с индивидуальными броуновскими временами. Этот теоретический эффект подтвержден данными компьютерного моделирования методом броуновской динамики для модельных двух- и трехфракционных дипольных жидкостей.

Полученные данные демонстрируют важность учета совместного влияния полидисперсности и межчастичного взаимодействия при анализе экспериментальных данных по магнитной релаксометрии реальных феррожидкостей, наночастицы в которых никогда не бывают одинакового размера.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект «Уральский математический центр», соглашение № 075-02-2022-877.

АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОНЕЧНОГО ОБЪЁМА ФЕРРОЖИДКОСТИ В КОАКСИАЛЬНОМ ЗАЗОРЕ ПРИ ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ СТенок

Иванов А.С.¹, Косков М.А.^{1,2}, Сомов С.А.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
lesnichiy@icmm.ru, koskov.m@icmm.ru

С целью получения информации о динамике конечного объёма магнитной жидкости (феррожидкости) в цилиндрическом коаксиальном зазоре вокруг намагниченного тела при поступательном движении стенок проводится экспериментальное исследование. Задача эксперимента – установить зависимость силы сопротивления движению от параметров задачи, среди которых вязкость феррожидкости, её объём, геометрические параметры зазора, намагниченного тела, создаваемого им магнитного поля и т.п. Для решения задачи сконструирована и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1). Расположенная вертикально прямая стеклянная трубка круглого сечения, внутрь которой с верхнего конца загружается магнитное тело (постоянный магнит). На поверхность магнита предварительно наносится небольшой объём исследуемой магнитной жидкости, который удерживается магнитным полем [1]. После загрузки в трубку магнит движется под действием силы тяжести, силы вязкого трения жидкости и выталкивающей силы магнитной жидкости, не дающей соприкоснуться магниту со стенками трубки [2]. Измерительная часть установки представляет собой несколько датчиков Холла, расположенных на внешней поверхности трубки. Временная зависимость сигнала датчиков (рис. 2) предоставляет информацию о характере движения магнита и силе сопротивления движению.

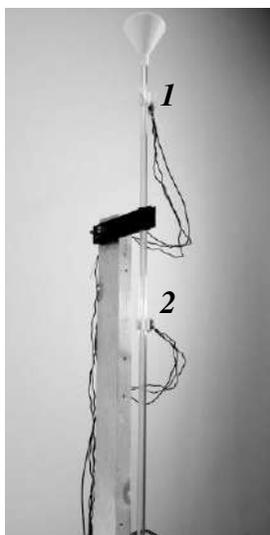


Рис. 1 Экспериментальная установка. Места размещения датчиков Холла указаны цифрами.

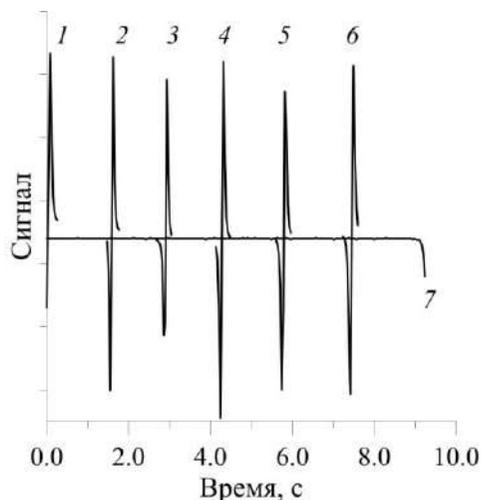


Рис. 2 Типичная временная зависимость сигнала датчиков Холла. Принцип нумерации датчиков ясен из рис 1.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00100).

Литература

[1] Розенцвейг Р.Е. Феррогидродинамика, пер. с англ., М.: Мир, 1989. – 356 с.

[2] Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости, М.: Химия, 1989.

О СООТНОШЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ОБЪЁМНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТВЁРДОЕ ТЕЛО В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Иванов А.С., Пшеничников А.Ф.

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ("ИМСС УрО РАН"), Пермь
lesnichiy@icmm.ru

В связи с тем, что в последние два десятилетия акцент применения магнитных жидкостей сместился с инженерного на биомедицинский, на первый план выступили исследования транспортных свойств магнитоуправляемых сред, используемых для задач направленного транспорта лекарств, фармацевтических микрофлюидных чипов, разделения биологических клеток, сепарации сыпучих гранулированных материалов и т. д. Все перечисленные приложения описываются одной фундаментальной задачей о магнитной силе плавучести, действующей на тело, погружённое в неоднородно намагниченную магнитную жидкость. Для этой пондеромоторной силы известно общее аналитическое выражение, полученное проф. Розенцвейгом [1] ещё в 1960ые. Однако это выражение представляет собой интегралы по поверхности тела и зависит от конфигурации магнитного поля. Поэтому аналитические исследования требуют упрощения этой задачи, наиболее очевидные три из которых — это использование сферической формы твёрдого тела, линейного закона намагничивания $M = \chi H$, где H — напряжённость магнитного поля, а χ — восприимчивость ферроколлоида, а также магнитного поля постоянного градиента вдоль некоторого выбранного направления (оси z). Интегрируя формулу Розенцвейга [1] в рамках указанных упрощений можно получить выражение для силы, состоящее, как и исходная формула, из двух слагаемых, имеющих разный физический смысл: первое слагаемое описывает вклад объёмных сил F_1 , а второе слагаемое — поверхностных F_2 . Такое разделение связано в первую очередь с тем, что во втором слагаемом интеграл по поверхности вычисляется от магнитоэстатического давления, вызванного скачкообразным изменением намагниченности при переходе от магнитной жидкости к немагнитному (диа- парамагнитному) телу. Отношение этих двух сил выражается формулой [2]

$$F_2 / F_1 = 3\chi / [5(1 + 0.4\chi)].$$

Таким образом, в разбавленных и намагниченных до насыщения магнитных жидкостях ($\chi \ll 1$) вклад поверхностных сил пренебрежимо мал, в то время как для концентрированных коллоидов в слабых полях ($\chi \gg 1$) поверхностные силы сопоставимы и даже могут превышать объёмные. Это выражение позволяет объяснить часть экспериментальных данных, полученных ранее при исследовании силы плавучести, действующей на суперпарамагнитное тело в немагнитной (стеклянной) оболочке, погружённое в намагниченную магнитную жидкость [3].

Литература

- [1] Rosensweig R.E. Buoyancy and stable levitation of a magnetic body immersed in a magnetizable fluid // Nature, 1966, vol. 210, p. 613-614.
- [2] Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F. Magnetostatic buoyancy force acting on a non-magnetic sphere immersed in a ferrofluid magnetized by a gradient field // J. Magn. Magn. Mat. 2023. Vol. 565. Art. No. 170294 (8 p.).
- [3] Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F., Khokhryakova C.A., Somov S.A., Koskov M.A. Floating of dia-, para-, and superparamagnetic bodies in magnetic fluids: Analysis of wall effects in the framework of inductive approach // Phys. Fluids. 2021. Vol. 33. Art. No. 112001 (10 p.).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ С ТЕТРАЭДРАЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПОВ РАЗНОМОДУЛЬНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Иванов М.В.¹, Михайлов А.А.¹, Антонова О.В.¹, Кузьмин В.А.²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

² Проект «Тетрал», Санкт-Петербург

ivanov.m@compmechlab.ru, michailov@compmechlab.com,
antonova_ov@spbstu.ru, v.kuzmin@tetral.ru,

Композиционный материал, обладая сложной микроструктурой, представляет собой комбинацию материалов с различными свойствами. С математической точки зрения композиционный материал рассматривается как неоднородная изотропная среда и при численном моделировании часто заменяется однородным материалом с эффективными анизотропными свойствами, которые демонстрируют различное поведение материала при растяжении и сжатии. Для того чтобы аккуратно учесть эти особенности при численном моделировании конструкций, состоящих из такого рода материалов, обоснованным является применение подходов, заложенных в основу разномодульной теории упругости [1-3].

Данная работа посвящена моделированию слоистых (sandwich) панелей с тетраэдральным наполнителем, применяющихся преимущественно в строительстве [4]. Для численного анализа поведения разномодульного материала применяется итерационный метод оценки напряженно-деформированного состояния конструкции.

Серия расчётов подтвердила обоснованность применения принципов разномодульной теории упругости для данного типа конструкций [5] и позволила убедиться в перспективности использования таких панелей в качестве альтернативы классическим вариантам с сотовым наполнителем [6].

Литература

- [1] Амбарцумян С. А., Хачатрян А. А. Основные уравнения теории упругости для материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию // Инж. журн. Механика твердого тела. 1966. № 2. С. 44–53.
- [2] Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости М.: Наука, 1982. -320 с.
- [3] Цвелодуб И. Ю. О разномодульной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 1. С. 157-164
- [4] Патент № 2715157 С1 Российская Федерация, МПК В32В 7/00, В32В 15/00, В32В 3/12. Заполнитель с ферменной объёмной структурой многослойной композитной панели: № 2019106951: заявл. 12.03.2019: опубл. 25.02.2020 / В. А. Кузьмин
- [5] Yu Qiu, Wei Shen, Renjun Yan, Xiaobin Li, Zhenzhou Ye, Mengzhen Li, Kang Liu, Kai Qin, An improved numerical method for calculating mechanical properties of bi-modulus sandwich composite structures, Ocean Engineering, Volume 250, 2022, 110998
- [6] Найшут Ю.С. Сотовые строительные конструкции. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 1998. 140с.

О ВЛИЯНИИ НЕМОДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЗАТОПЛЕННУЮ СТРУЮ

Иванов О.О., Гареев Л.Р., Ашуров Д.А., Веденеев В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва
ivanov@mail.msu.ru, vasily.vedeneev@mail.ru

В пограничных слоях наряду с модальной неустойчивостью, связанной с появлением волн Толлмина-Шлихтинга, наблюдается также и немодальная, или алгебраическая, неустойчивость, приводящая к так называемому «байпасному» переходу к турбулентности. В затопленных струях модальная неустойчивость изучена теоретически и экспериментально [1], однако немодальный механизм неустойчивости экспериментально до сих пор не исследован.

В данной работе исследовалось немодальное возмущение, возникающее в затопленной струе с длинным ламинарным участком [1, 2], при установке в поток специальных возмущающих конструкций – «дефлекторов». Они представляют собой тонкую, почти цилиндрическую деталь, входное сечение которого представляет окружность с радиусом в два раза меньше, чем радиус струи, а выходное – возмущенную синусоидально окружность с определенным азимутальным волновым числом.

С помощью метода PIV было показано, что для каждого азимутального числа n в возмущении наблюдается n пар противорвращающихся продольных вихрей, обуславливающих так называемый «lift-up» механизм неустойчивости течения: они перемещают медленно движущуюся жидкость в сторону оси, а быстро движущуюся – в сторону периферии. Продольная скорость $V_z(z)$ возмущения нарастает линейно в зависимости от продольной координаты z , а поперечная составляющая скорости возмущения $V_x(z)$ мала относительно максимума скорости основного течения и изменяется слабо, а энергия возмущения $K(z)$ растет квадратично.

Проведено сравнение полученного в эксперименте возмущения и оптимального возмущения, найденного при решении задачи устойчивости. Оценки скорости роста экспериментального возмущения дали величину, на порядок меньшую, чем для оптимального возмущения. Полученная разница на один порядок обуславливается тем, что в теоретических расчетах находилось наиболее быстрорастущее возмущение, в то время как в эксперименте моделировалось возмущение, подобное немодальному, и не ставилась задача обеспечить его наибольший рост.

Во второй части доклада обсуждается взаимодействие немодальной и модальной устойчивостей для различных n и частот модального возмущения [2]. В экспериментах исследовалось нарастание гармонических возмущений в струе, возмущенной установленным дефлектором. Показано, что коэффициент роста в возмущенной таким образом струе меньше, чем в невозмущенной, на расстоянии до 3 диаметров струи, что согласуется с предсказаниями линейной теории [3].

Литература

- [1] Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Чичерина А.Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Изв. РАН. МЖГ. – 2018. – № 1. – С. 97–106.
- [2] Gareev L.R., Zayko J.S., Chicherina A.D., Trifonov V.V., Reshmin A.I., Vedeneev V.V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. – 2022. – V. 934. – A3.
- [3] Wang C, Lesshafft, L., Cavalieri, A. V., Jordan, P. The effect of streaks on the instability of jets // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – T. 910.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ АРОЧНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ ПЛОТИНЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТКАЛИБРОВАННОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ И НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛЯМИ

Иванов П.С.

АО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева», Санкт-Петербург

ivanovps@vniig.ru, ivanovps@pm.me

Радиальные перемещения арокных и арочно-гравитационных бетонных плотин – это одни из самых важных диагностических показателей таких сооружений. Анализ изменений значений этих показателей в зависимости от температуры в бетоне и уровня воды в водохранилище позволяет оценить изменение состояния плотины в целом. Неожиданное изменение состояния может быть вызвано нарушением в работе сооружения, что требует дополнительных мероприятий по её обследованию.

Для обнаружения потенциально опасных изменений состояния создаются прогнозные модели перемещений плотины. При отклонении прогноза на значение, превышающее критерии безопасности состояние считается опасным.

Модели подразделяются на три типа: статистические, детерминированные и смешанные. В качестве статистических прогнозных моделей традиционно используется полиномиальная регрессия или, в последнее время, нейронные сети. Детерминированные модели получают в ходе калибровки конечно-элементной модели плотины. Смешанные, соответственно, комбинируют статистический и детерминированный подходы.

В данной работе проведена калибровка конечно-элементной модели плотины и обучена нейросетевая прогнозная модель на основе данных натуральных наблюдений. Так же приведен метод построения смешанной модели, позволяющий объединить оба подхода. В итоге проведено сопоставление моделей и определена их точность. Показано, что среди построенных моделей, смешанная модель позволяет получить наиболее точный прогноз.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ПОЛИУРЕТАНЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Иванов Я.Н.¹, Чудинов В.С.², Шардаков И.Н.², Морозов И.А.², Беляев И.Ю.²

¹*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

jaroslavrussia@gmail.com

Нанопокрывтия, формируемые различными плазменными и химическими методами на поверхности полимерных материалов, обладают уникальными свойствами. Свойства нанопокрывтий, такие как смачиваемость, твердость, шероховатость, проницаемость, теплопроводность и электропроводность, значительно отличаются от свойств полимерной подложки. Наиболее перспективными областями применения нанопокрывтий являются гибкая нанооптика и наноплазмоника, гибкая электроника и наносенсоры [1]. Применимость полимерного материала с нанопокрывтием при определенных деформациях определяется механическими свойствами нанопокрывтия. Определение модуля упругости нанопокрывтия является первостепенной задачей, поскольку его значение необходимо для расчета напряженно-деформированного состояния изделия. К числу наиболее широко используемых методов определения модуля упругости нанопокрывтий относятся наноиндентирование, атомно-силовая микроскопия и SIEBIMM [2]. Традиционные макромеханические эксперименты неприменимы для определения модуля упругости нанопокрывтия, поскольку существенным ограничением является толщина нанопокрывтия. Однако, в случае, когда жесткость нанопокрывтия на порядок больше жесткости полимерной подложки, модуль упругости покрытия можно определить по результатам испытаний на одноосное растяжение и модели многослойной балки [3].

В работе представлены результаты определения модуля упругости карбонизированного слоя, сформированного на полиуретановой подложке при различных режимах обработки методом ионной имплантации. Предложена методика определения модуля упругости карбонизированного нанослоя, сформированного плазменной обработкой поверхности полимера, по результатам испытаний на одноосное растяжение. Продемонстрировано применение экспериментального метода одноосного растяжения образцов для определения модуля упругости нанопокрывтия на мягкой подложке. Результаты этого подхода сравниваются с результатами двух других подходов, использующих данные атомно-силовой микроскопии. Затем изменения модуля упругости в зависимости от флюенсов плазменной обработки поверхности образца сравниваются с соответствующими изменениями молекулярной структуры поверхностного слоя. Молекулярную структуру оценивали по результатам инфракрасной Фурье-спектроскопии и спектральной эллипсометрии.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/875 и финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-48-596014 р_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Mo, R. Functional Nanomaterial-Based Flexible Electronics // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – 809.
- [2] Niinivaara E., Desmaisons J., Dufresne A. et. al. Film thickness limits of a buckling-based method to determine mechanical properties of polymer coatings // Journal of Colloid and Interface Science. – 2021. – Vol. 582. – P. 227-235.
- [3] Shardakov I., Ivanov Y., Chudinov V. et. al. Mechanical characteristics of the carbonized layer on the surface of polyethylene treated by the ion-plasma method // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 37. – P. 1065-1072.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ РАБОТЕ КОМБАЙНОВОГО КОМПЛЕКСА

Иванцов А.О.¹, Любимова Т.П.¹, Исаевич А.Г.², Семин М.А.², Суханов А.Е.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Горный институт УрО РАН, Пермь

seminma@inbox.ru, aero_alex@mail.ru, andy1997sae@gmail.com

Рассматривается модель тупиковой горной выработки калийного рудника. В горной выработке находится комбайновый комплекс, состоящий из комбайна и бункера-перегрузателя. В процессе работы комбайна происходит разрушение и измельчение массива калийной соли, а также сопутствующее выделение пыли и газов [1, 2]. Для разбавления и удаления вредных примесей горная выработка проветривается с помощью вентилятора местного проветривания и присоединенного к нему вентиляционного трубопровода, протянутого до кабины машиниста комбайна.

В настоящей работе основное внимание уделяется изучению динамики газовой смеси в тупиковой горной выработке. При разрушении массива калийной соли из него выделяются газы: метан и сероводород. Наиболее распространенными на практике являются случаи выделения метана. Система вентиляции должна обеспечивать удаление вредных примесей из тупиковой выработки и не допускать скопления метана до сверхнормативных и взрывоопасных концентраций. При этом основной практический интерес представляет анализ возможности использования всасывающего способа проветривания для удаления метана, выделяющегося при ведении горных работ, анализ эффективности всасывающего способа проветривания в сравнении с наиболее распространенным нагнетательным способом.

Данная задача решается посредством многопараметрического моделирования стационарного распределения параметров газовой смеси на параметризованной по данным эксперимента модели. Расчеты проводились с учетом тепловыделения комбайна и работы вентиляторов его двигателей. Определены параметры вентиляционной системы, необходимые для полного удаления выделяющихся газов из тупиковой выработки в различных условиях. Проведено сравнение динамики газовой смеси при наличии и в отсутствие комбайнового комплекса в выработке. Определено оптимальное расположение всаса вентиляционной системы.

Литература

- [1] Isaevich A., Semin M., Levin L., Ivantsov A., Lyubimova T. Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes // Sustainability. – 2022. – V.14(5) – 3030.
[2] Semin M., Isaevich A. Analysis of Methane–Air Mixture Dynamics in a Dead-End Drift Ventilated Using an Exhaust System // Computation. – 2022. – V.10 – P.212.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАССИВНОГО СКАЛЯРА В ДВУМЕРНОМ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ С ФЛУКТУАЦИЯМИ

Ивченко Н.А., Вергелес С.С.

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН

ivchenkona@yandex.ru, ssver@itp.ac.ru

Рассматривается турбулентное течение в двумерной гидродинамике, которое характеризуется флуктуациями скорости, являющимися случайными как во времени, так и в пространстве, и реализуется, например, в тонких слоях жидкости. Динамика данной системы отличается от случая трехмерной турбулентности: энергия, вносимая в систему, будет переноситься к более крупным масштабам [1]. Так, из-за нелинейного взаимодействия флуктуаций формируется обратный каскад энергии, в результате которого образуются когерентные вихри [2]. Его течение в системе отсчета, связанной с центром вихря, можно охарактеризовать как осесимметричное дифференциальное вращение с устойчивой во времени средней полярной скоростью $U_\varphi(r)$, задающейся сдвигом $\Sigma = \nabla_r U_\varphi$, и гладким хаотическим полем флуктуаций скорости, малых по сравнению с U_φ [3]. В работе изучалась статистика переноса внутри подобного потока поля θ в рамках модели пассивного скаляра (это может быть, например отклонение температуры или концентрация примеси), где пренебрегается его обратной реакцией на само течение. Его эволюция описывается уравнением:

$$\partial_t \theta + (\Sigma u \partial_x + \sigma_{ij} r_j \partial_i) \theta = \kappa \Delta \theta + f,$$

где f – внешний источник накачки скаляра, а κ – коэффициент диффузии (является слабым эффектом в нашей системе). Флуктуации течения, описываемые случайной матрицей $\sigma_{ij}(t) \ll \Sigma$, приводят к перемешиванию скаляра и сглаживают его неоднородности в пространстве, которое обладает нетривиальными статистическими свойствами. Рассмотрены распад некоторого начального распределения и случай накачки системы скаляром. Изучалась динамика парной корреляционной функции – результата усреднения по статистике как начальных условий/накачки, так и флуктуаций течения. Для этого рассматривалась статистика лагранжевых траекторий в таком потоке, поскольку в отсутствие диффузии эволюция скаляра является адвекцией вдоль них. Следующим шагом были учтены эффекты слабой, но конечной диффузии – в частности было показано, что она приводит к изменению во времени одноточечных моментов скаляра $\langle \theta^n \rangle$.

Рассматриваемый процесс перемешивания наследует многие свойства задачи в статистически изотропном случайном гладком течении [4], но модифицируется вследствие наличия сильного постоянного сдвига Σ . Описана возникающая анизотропия в пространственном распределении. Как в случае распада, так и в случае постоянного возбуждения флуктуаций скаляра внешним источником f с однородной статистикой во времени, эволюция системы приходит в квазистационарный режим и обладает сильной перемежаемостью, на что указывают найденная в работе динамика одноточечных моментов.

Литература

- [1] Kraichnan R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence – Phys. Fluids 10, 1967. – p. 1417-1423.
- [2] Laurie J., Boffetta G., Falkovich G., Kolokolov I., and Lebedev V. Universal profile of the vortex condensate in two-dimensional turbulence – Phys. Rev. Lett. 113, 2014. – p. 254503.
- [3] Kolokolov I. and Lebedev V. Structure of coherent vortices generated by the inverse cascade of two-dimensional turbulence in a finite box – Phys. Rev. E 93, 2016 – p. 033104.
- [4] Balkovsky E., Fouxon A. Universal long-time properties of Lagrangian statistics in the Batchelor regime and their application to the passive scalar problem – Physical Review E 60, 1999. – p. 4164.
- [5] Ivchenko N.A., Lebedev V.V., Vergeles S.S., Spatial statistics of passive scalar in two-dimensional shear flow with fluctuations – arXiv:2212.03040, 2022.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ СТРУКТУРИРОВАННОГО МАГНИТОАКТИВНОГО ЭЛАСТОМЕРА С МАГНИТОЖЕСТКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В 2D ПОСТАНОВКЕ

Игнатов А.А.¹, Столбов О.В.², Родионова В. В.¹

Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, Россия
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
artem.ignatov98@gmail.com

К композитным материалам на основе полимера с магнитными включениями наблюдается повышенный интерес в последние несколько лет [1, 2]. Для изучения количественных свойств таких материалов применяются численные методы [3]. В данной работе представлен результат расчетов деформаций во внешнем поле структурированного магнитоактивного эластомера с магнитожесткими включениями в 2D постановке. При расчетах использовался метод конечных элементов, реализованный с использованием пакета FEniCS.

В начальном состоянии частицы (рис. 1а) находились в узлах прямоугольной сетки 4 на 4 с квадратными ячейками и имели ориентацию магнитных моментов, схематически изображенных на рисунке 1б.

Для описания гиперупругого материала матрицы использовался потенциал Нео-Гука [4]. При моделировании форма частиц предполагалась идеальным кругом, а сами частицы считались однодоменными. Также при моделировании исключалась возможность разрушения границы матрица-частица, т.е. предполагалась полная адгезия частиц и матрицы.

В результате были рассчитаны деформации материала в зависимости от начальной ориентации намагниченности частиц и величины их магнитных моментов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 21-72-30032.

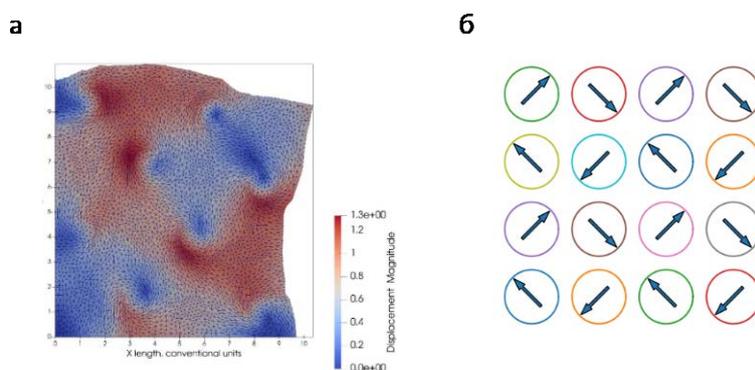


Рисунок 1. а) Деформация эластичной матрицы с магнитожесткими частицами во внешнем магнитном поле; б) Схематическое начальное положение частиц.

Литература

- [1] Allue A., Corte-León P., Gondra K., Zhukova V., Ipatov M., Blanco M., Zhukov A. Smart composites with embedded magnetic microwire inclusions allowing non-contact stresses and temperature monitoring // *Composites Part A*. – 2019. – V. 120. – P. 12–20.
- [2] Omelyanchik A., Antipova V., Gritsenko C. et al. Boosting magnetoelectric effect in polymer-based nanocomposites // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11. – Art. no. 1154 (22 pp.)
- [3] Sossou G., Demoly F., Belkebir H., Qi H. J., Gomes S., Montavon G. Design for 4D printing: Modeling and computation of smart materials distributions // *Materials and Design*. – 2019. – V. 181. – Art. no. 108074 (11 pp.)
- [4] Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ В ПРОЦЕССЕ ПОСТИМПЛАНТАЦИОННОГО ОСТЕОГЕНЕЗА ПРИ УСТАНОВКЕ ИМПЛАНТАТА ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Игнатова А.М.^{1,2}, Асташина Н.Б.³, Роготнев А.А.¹, Логинова Н.П.³,

Наймарк О.Б.¹, Рапекта С.И.³

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Пермь*

³*Пермский государственный медицинский университет им. Академика Е.А. Вагнера, Пермь*
iampstu@yandex.ru, caddis@mail.ru, rogotnev.a@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Наличие большой экспериментальной базы по результатам остеинтеграции имплантатов из сплавов титана с учетом указанных показателей, позволяет создавать математические модели отдельных клинических случаев, прогнозировать их заживление, выбирать оптимальные параметры имплантата и решать другие клинические задачи с высокой долей достоверности. Однако, математические модели, верифицированные на титане, не подходят для неметаллических материалов, таких как, например, углерод-углеродный композиционный материал, который является перспективным для имплантации в челюстно-лицевой хирургии и при замене тазобедренных суставов.

Целью настоящего исследования является поиск параметров для оценки и прогнозирования динамики минерализации костной ткани в процессе постимплантационного остеогенеза при установке имплантата из углерод-углеродного материала, на основе экспериментальных данных.

В качестве объектов исследования рассматривались изображения микроскопии гистологических срезов костных тканей экспериментальных животных в зоне контакта с имплантатом, полученные на 6 и 9 месяцы после операции, при увеличениях $\times 50$, $\times 100$, $\times 200$. Для анализа изображений использовался метод сегментации. Обработку изображений проводили с применением универсального программного обеспечения ImageJ-FiJi.

В качестве критериев оценки остеинтеграции при анализе изображений рассматривались: динамика изменения площади минерализованной ткани; динамика убывания волокнистой соединительной ткани; соотношение площадей волокнистой соединительной ткани и минерализованной ткани на указанных этапах процесса заживления.

При сравнении показателей изображений, соответствующих двум временным периодам установлено, что средняя скорость прироста минерализованной ткани составляет 1,90% в месяц, при этом скорость убыли волокнистой ткани составляет 4,95%. Соотношение доли минерализованной ткани к волокнистой в указанный период заживления изменяется в диапазоне от 0,90 до 5,54, что соответствует экспоненциальному росту.

Таким образом, при поиске параметров, характеризующих динамику минерализации костной ткани в процессе постимплантационного остеогенеза при установке имплантата из углерод-углеродного материала, выявлено, что показательным параметром меняется отношение минерализованной ткани к волокнистой соединительной, данный параметр учитывает нюансы различной скорости убыли и прироста соответствующих тканей и имеет экспоненциальный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ 122031400671-1).

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСЧИСЛЯЕМЫХ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЫХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ШПИНЕЛИД-ПИРОКСЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Игнатова А.М.¹, Верещагин В.В.², Наймарк О.Б.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Томский политехнический университет, Томск*

iampstu@yandex.ru, vver@tpu.ru, naimark@icmm.ru

Исчисляемые структурные параметры литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов, такие как, размер зерна фазы шпинелида, толщина прослойки пироксенов, толщина прослойки стеклофазы, определяют их важнейшие физико-механические свойства, а именно коэффициент износа, термостойкость, механическую прочность и диссипативную способность. Прогнозирование указанных параметров структуры с помощью математических моделей является средством обеспечения заданного уровня обозначенных свойств. Существующие модели прогнозирования структуры описывают равновесное затвердевание и кристаллизацию, а поскольку формирование структуры данных материалов реализуется в неравновесных условиях они не могут обеспечить достоверный результат. Синтез литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов позволяет фиксировать состояние структуры на разных этапах ее формирования, поэтому для поиска взаимосвязи исчисляемых параметров структуры при неравновесных условиях формирования, можно использовать экспериментальный подход.

Целью работы является разработка принципиальных подходов к определению исчисляемых структурных параметров литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов в условиях неравновесной кристаллизации.

В качестве объекта исследования в работе выступает расплав состава, мас. %: SiO₂ – 45; MgO – 15,5; CaO – 12,5; Al₂O₃ – 15,5; FeO – 6,5; Fe₂O₃ – 3,5; TiO₂ – 1; Na₂O+K₂O – 3; CaF₂ – 1,5; Cr₂O₃ – 1,5; и материал полученный при его кристаллизации и затвердевании.

Оценка исчисляемых параметров структуры была проведена петрографическим анализом (оптический микроскоп Nikon Eclipse E 600 POL) с использованием анализа изображений (ImageJ-Fiji).

В качестве метода обработки изображений использованы: построение диаграмм Вороного, ориентационный анализ, дендритный анализ.

Таким образом, установлено, что наиболее эффективными принципиальными подходами к определению исчисляемых структурных параметров литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов в условиях неравновесной кристаллизации методом анализа изображений являются методы, основанные на построение диаграмм Вороного. С их помощью было установлено, что структура литых стеклокристаллических шпинелид-пироксеновых материалов, описывается сферолитно-сетчатой моделью исчисляемыми параметрами, которой являются размер сферолитов образованных шпинельными и пироксеновыми фазами, соотношение фаз в сферолитах и плотность распределения сферолитов на единицу площади поверхности среза. Ориентационный и дендритный анализы обеспечивают интегральные исчисляемые характеристики структуры на разных этапах неравновесного затвердевания и кристаллизации, однако, их возможность с точки зрения прогнозирования свойств материалов ограничена.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного контракта №АААА-А19-119013090021-5.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В УГЛЕРОДНОМ СЛОЕ

Изюмов Р.И.¹, Осоргина И.В.², Пелевин А.Г.², Свистков А.Л.¹, Чудинов В.С.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
izumov@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

Полиуретан – перспективный материал для применения в области медицины, в частности, для изготовления эндопротезов. Для обеспечения условий совместимости с биологическими тканями организма существуют методики модификации полиуретана, один из этапов которой является ионно-плазменная обработка, при которой изменения свойств поверхности происходят за счёт облучения ионами, в результате чего поверхностный слой трансформируется в так называемый углеродный слой. Нашей задачей являлось изучение трещиностойкости получаемых углеродных слоев и подверженности к отслаиванию под действием механических нагрузок. Критерий трещиностойкости – ширина раскрытия трещин при определенном значении растяжения образцов. Важность данного критерия связана с негативным воздействием на ткани их возможного защемления между берегов трещины. Для проведения исследований применялось специальное приспособление для растяжения образцов, позволяющее контролировать процесс растягивания с точностью до 0.1 мм, а также оптический электронный микроскоп, с помощью которого производились фотоснимки поверхности на различных этапах растяжения. Были разработаны оригинальные алгоритмы обработки оптических данных. Для оценки трещиностойкости предложены следующие параметры: модальная ширина трещин, плотность трещин и специальный параметр, позволяющий отличить различные механизмы, через которые может реализовываться растяжение поверхности (разглаживание рельефа, образование трещин). Анализ предложенных параметров позволил оценить пригодность разработанных рецептур и технологий изготовления полиуретановых образцов для медицинских целей.

С помощью атомно-силовой микроскопии был изучен рельеф в области берегов трещин на поверхности растянутого образца. Было установлено, что берег трещины сначала резко направляется вглубь материала, потом претерпевает излом и переходит в пологое вогнутое дно трещины. Излом указывает на нижнюю границу углеродного слоя. Таким образом, с помощью данной методики можно определять толщину углеродного слоя. Полученные результаты коррелируют с вычислениями на программе TRIM, выполненными с помощью численного моделирования процесса имплантации ионов азота в поверхность полиуретана.

Процесс растяжения сопровождается поджатием в поперечном направлении и возникновении волнообразного рельефа. При этом волны пересекают трещины примерно под прямым углом. Полученные на АСМ рельефы показали, что изогнутая волнообразная форма повторяется как углеродным слоем, так и дном трещины. Это говорит о том, что отслоения в области сильных растягивающих напряжений не возникло.

Были изучены следующие технологии изготовления образцов: 1. Образцы из литьевого полиуретана. 2. Образцы из литьевого полиуретана, покрытые слоем из растворного полиуретана. 3. Как образцы второго типа, но с добавлением нанонаполнителей в растворный слой. 4. Обработанные плазмой образцы из литьевого полиуретана, покрытые слоем из растворного полиуретана. Первый слой из литьевого полиуретана обрабатывается в двух режимах: 4а с флюенсом 10^{15} ион/см² и 4б с флюенсом 10^{16} ион/см². Ионно-плазменная обработка внешнего слоя проведена с флюенсами 10^{15} ион/см² и 10^{16} ион/см² при энергии ионов 20 кэВ. Фотоснимки производились при растяжении $\epsilon = 10, 15, 20, 30, 50, 100\%$, а также, при наличии возможности 2.5 и 5%.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОДИНАМИКУ И КИНЕТИКУ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Плехов О.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
fedorova@icmm.ru, vshivkov.a@icmm.ru, gachegova.e@icmm.ru, poa@icmm.ru

Генерация ударной волны с помощью лазерных импульсов высокой интенсивности была реализована еще в начале 1960-х годов [1]. Относительно недавно стало возможным создание безопасных, компактных и простых в управлении высокоэнергетических лазерных систем, которые легли в основу технологии лазерного ударного упрочнения материалов. В отличие от лазерного термического упрочнения при использовании этой технологии не происходит значительного разогрева обрабатываемого материала, а упрочнение происходит за счет воздействия ударной волны. Эффект достигается благодаря характерным особенностям лазерного ударного воздействия, таким как высокое давление, создаваемое в материале (порядка ГПа-ТПа), высокая плотность мощности воздействия (порядка ГВт/см²), крайне малое время воздействия (десятки наносекунд) и высокая скорость деформирования материала (достигает 10^7 1/с) [2].

Исследованию усталостных свойств материала после лазерной ударной обработки в последнее время уделяется большое внимание [3-5], поскольку эта методика позволяет не только упрочнить поверхностный слой, но и добиться управляемости и высокой предсказуемости развития трещины за счет создания определенной конфигурации полей остаточных напряжений. В рамках данной работы экспериментально исследовалось влияние лазерного ударного упрочнения на кинетические и тепловые особенности распространения усталостной трещины в образцах из титановых сплавов с концентратором напряжений. Показано, что технология лазерного ударного упрочнения эффективна при схеме обработки, включающей зону концентратора напряжений. Такой тип обработки формирует оптимальное поле остаточных напряжений, которое замедляет зарождение и развитие трещины. При этом интенсивность теплового потока в области вершины трещины снижается. Тепловой поток, связанный с пластическими деформациями у вершины трещины, косвенно отражает изменение эффективного коэффициента интенсивности напряжений, вызванное воздействием сформированного поля остаточных напряжений. Микроструктурные исследования показали, что дефекты (двойники), появляющиеся на поверхности материала в результате лазерной ударной обработки, не оказывают значительного влияния на скорость распространения усталостной трещины, а решающую роль играет конфигурация поля остаточных напряжений, создаваемых лазерным ударным воздействием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10168.

Литература

- [1] Askaryan G.A., Moroz E.M. Pressure of evaporation of matter in a radiation beam // J Exp Theor Phys (U.S.S.R.). – 1962. – V. 43. – P. 2319–2320.
- [2] US 2018258509 A1, 2018 (Sep 13).
- [3] Zhang C., Dong Y., Ye C. Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: A Review // Adv. Eng. Mater. – 2021. – № 2001216.
- [4] Aswegen D.C., Polese C. Experimental and analytical investigation of the effects of laser shock peening processing strategy on fatigue crack growth in thin 2024 aluminium alloy panels // International Journal of Fatigue. – 2021. – V. 142. – P. 105969.
- [5] Sunab R., Keller S., Zhuc Y., Guo W., Kashaev N., Klusemann B. Experimental-numerical study of laser-shock-peening-induced retardation of fatigue crack propagation in Ti-17 titanium alloy // International Journal of Fatigue. – 2021. – V. 145. – P. 106081.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРЕХ МЕХАНИЗМОВ РОСТА ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ В СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЕ

Илларионов Е.А.^{1,2}, Соколов Д.Д.^{1,2}

¹Московский государственный университет, Москва

²Московский центр фундаментальной и прикладной
математики, Москва

egor.illarionov@math.msu.ru

В работе рассматривается модель случайной среды с фиксированным и конечным временем памяти (короткокоррелированная модель). Внутри интервалов постоянных параметров среды мы можем наблюдать либо усиление, либо осцилляцию векторного поля в данной частице. Совместный эффект усиления на последовательных интервалах, очевидно, приводит к усилению среднего поля и средней энергии. Аналогично, эффект перемежающихся усиления или осцилляций также приводит к усилению среднего поля и средней энергии, однако, с меньшей скоростью. Наконец, возможно, что последовательные случайные колебания войдут в резонанс и приведут к росту среднего поля и энергии. Это и есть три механизма, которые мы исследуем и для которых, на примере уравнения Якоби со случайным параметром кривизны, будут представлены аналитические и численные оценки скоростей роста.

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ РЕАЛИЗАЦИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316LSI

Ильиных А.В., Паньков А.М., Феклистова Е.В., Струнгарь Е.М., Пермяков Г.Л.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

ilinih@yandex.ru, sem.pankov@gmail.com

В настоящее время все большее распространение получают аддитивные технологии, имеющие ряд преимуществ перед традиционными процессами изготовления [1]. Одним из видов таких технологий является дуговая наплавка металлической проволокой. Она позволяет создавать изделия с достаточно большими размерами и сложной геометрической формой за сравнительно небольшое время, по сравнению с другими видами аддитивных технологий, таких как селективная лазерная наплавка или сплавление. Представляет интерес изучение вопросов реализации механических свойств материалов в стандартных образцах и конструкциях более сложной геометрии, полученных методом дуговой наплавки [2,3,4].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований на растяжение, кручение и сдвиг образцов, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавки из стенки прямоугольной формы из нержавеющей стали 316 LSi. Также для испытания на растяжение из той же стенки были вырезаны 4 типа стержневых конструкций разной формы в аналогичных направлениях. Испытания проводились в Центре коллективного пользования ЦЭМ ПНИПУ с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений. Из испытаний на растяжение, кручение и сдвиг стандартных образцов получены упругие механические характеристики аддитивного материала. При этом значения модуля сдвига в испытаниях на кручение имеют заметные отличия от значений модулей сдвига в испытаниях на сдвиг. Для стержневых конструкций из испытаний на растяжение получены зависимости нагрузки от перемещения (использована функция «виртуальный экстензометр» в VIC 3D), из анализа которых были определены характеристики жесткости стержневых конструкций.

Проведено численное моделирование НДС стержневых конструкций с упругими свойствами, значения которых были получены из испытаний стандартных образцов. Определялись расчетные характеристики жесткости стержневых конструкций. Из сопоставления полученных экспериментально и численно жесткостей стержневых конструкций делается вывод о целесообразности использования модулей сдвига из испытаний на кручение или сдвиг для моделирования НДС наплавленных материалов.

Экспериментальные исследования были выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-48-596007-р_НОЦ_ Пермский край). Отработка режимов и наплавка заготовок для образцов выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № FSNM-2021-0011)

Литература

- [1] Игисенов Б.К., Селективное лазерное спекание металлов в аддитивных технологиях / В.Е. Касутин, А.В. Креймер, К.В. Выблов // Вестник современных исследований. - 2018. - No. 4.2 (19). - ст. 235-239.
- [2] Fedorenko A., Fedulov B., Kuzminova Y., Evlashin S., Staroverov O., Tretyakov M., Akhatov I. Anisotropy of mechanical properties and residual stress in additively manufactured 316l specimens // Materials. – 2021. – V.14(23).
- [3] Паньков А.М., Ильиных А.В., Исследование зависимости механических характеристик SLM-образцов от направления выращивания // Математическое моделирование в естественных науках. – 2021. – т.1 – С. 355-357
- [4] Ильиных А.В., Паньков А.М., Третьякова Т.В., Феклистова Е.В., Лыкова А.В., Струнгарь Е.М., Муллахметов М.Н. Испытания на кручение образцов из сплава AlSi10Mg, полученных SLM-методом // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021. – т.2 – С. 64-67.

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К УСТРАНЕНИЮ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gleb@ilinyh.ru, sou2009@mail.ru*

В процессе конструирования деталей на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ) для решения тех или иных технологических задач в конструкцию добавляют вставки из различных материалов: сферопластики, металлы, сотовые наполнители и др. В эту же категорию входят пластики на основе различных армирующих элементов (стекло-, угле-, органоволокно). Различие термомеханических свойств слоёв приводит к неоднородному деформированию конструкции, формированию остаточных напряжений и, как итог, нарушению формы изделия.

В работе рассматриваются вопросы прогнозирования и устранения дефектов формы модельных композиционных оболочек на тканой основе. Все рассматриваемые задачи решаются методом конечных элементов в рамках линейной модели вязкоупругого поведения материалов композита.

Для определения полного набора констант тензора податливости анизотропного композита применён трёхуровневый (микро-, мезо-, макроуровень) подход определения эффективных свойств многослойного композита. За счёт использования модифицированного подхода моделирования ПКМ на мезоуровне произведён учёт взаимного смещения нитей основы и утка в условиях наличия дефекта укладки тканого наполнителя.

Исследованы различные подходы к исключению дефектов формы изделия. Первый подход заключается в модификации конструкции за счёт дополнительного слоя, компенсирующего деформации, вызванные гетерогенностью материалов конструкции [1]. Введён критерий снижения остаточных деформаций и получены его зависимости от характеристик компенсирующего слоя. Второй подход заключается в постпроизводственном снижении деформации за счёт механизма релаксации остаточных напряжений в рамках дополнительного цикла «нагружение-нагрев-выдержка-охлаждение-разгрузка». Третий подход заключается в коррекции формы оснастки для изготовления изделия на основе полученного в рамках предварительного расчёта напряженно-деформированного состояния конструкции. Проведено сравнение эффективности подходов на основе введённого критерия.

Литература

[1] Сметанников О.Ю. Экспериментальное и численное исследование эволюции деформаций круглой пластины из эпоксидной смолы при неравномерном охлаждении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009 – Т. 2, № 3 – С. 96-105.

ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Бекмансуров М.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gleb@ilinyh.ru, sou2009@mail.ru

В процессе порошковой лазерной наплавки в деталях появляются остаточные напряжения, что приводит к их короблению. Минимизация коробления возможна за счёт корректировки режима наплавки по результатам моделирования рассматриваемого процесса. Существуют различные подходы к симуляции порошковой наплавки в рамках метода конечных элементов. В рамках симуляции необходимо найти поля температур, возникающих в детали в процессе нагрева с перемещающимся источником тепла (пятно лазера) и поля перемещений узлов конструкции в процессе наплавки и после окончательной выдержки.

В рамках работы разработан и реализован в программном комплексе ANSYS/ANSYS Workbench алгоритм моделирования лазерной порошковой наплавки, основанный на поэтапной активации заранее деактивированных конечных элементов наплавляемого материала. Алгоритм подразумевает поэтапное решение краевой нестационарной задачи теплопроводности и поэтапное решение краевой квазистатической задачи термомеханики с конвективной теплоотдачей на адаптируемой внешней границе модели в процессе поэтапного изменения объёма модели. Задачи являются несвязанными. Для описания упругопластического поведения материалов в рамках задачи термомеханики использованы модели пластичности с билинейным и мультилинейным изотропным упрочнением с температурной зависимостью параметров.

Моделирование задач подобного рода сопровождается проблемами учёта траекторий наплавки при создании геометрического и конечно-элементного аналога наплавляемых слоёв, проблемой сходимости численного решения, большими требованиями к вычислительным ресурсам, необходимостью автоматизации итерационной процедуры расчёта. Существующие решения, в том числе реализованные в ANSYS/ANSYS Workbench, зачастую приводят к построению требовательных к вычислительным ресурсам моделей за счёт избыточной конечно-элементной сетки, необходимости решения многошагового решения поставленных краевых задач и т.п.. В рамках данной работы разработана методика моделирования процесса лазерной порошковой наплавки, основанная на независимости вида геометрического и конечно-элементного аналога конструкции от режима лазерной наплавки. Преимуществами данного подхода являются: возможность генерации высококачественных структурированных сеток; гибкая система изменения активируемого объёма элементов без необходимости перестройки геометрии и сетки. Для реализации данного подхода построены специальные макросы на языках APDL и IronPython.

Построена модель симуляции процесса лазерной порошковой наплавки трубчатых образцов. Проведено исследование численной сходимости задачи теплопроводности по значениям внутренней энергии. Проведён анализ сходимости решения задачи термомеханики, в том числе исследовано влияние размера активируемого объёма на НДС конструкции. Проведена верификация полученных полей остаточных деформаций.

Литература

[1] Сметанников О.Ю., Трушников Д.Н., Максимов П.В., Бартоломей М.Л., Ковязин А.В. Моделирование в ANSYS термомеханического поведения изделия в процессе 3D-наплавки проволочных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 154–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.11.

УПРАВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ В АЭРОДИНАМИКЕ И ТЕПЛОФИЗИКЕ

Исаев С.А.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Объектами внимания являются вихревые ячейки – тандемы тел и каверны с отсосом, структурированные энергоэффективные поверхности с вихревыми генераторами – наклонными канавками. Наблюдаемые эффекты и сделанные открытия базируются на формируемых и самоорганизующихся высокоинтенсивных уловленных вихрях, в том числе интенсифицированных за счет отсоса, а также высокоинтенсивных смерчеобразных структурах в наклонных канавках, генерируемых за счет экстраординарных перепадов давления. Рассматриваемые достижения связаны с ультравысокими коэффициентами подъемной силы толстых профилей (полукругового цилиндра), снижением лобового сопротивления тел с вихревыми ячейками, снижением лобового сопротивления и головной стабилизацией тел с передними и хвостовыми уловленными вихрями, аномальной интенсификацией отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на энергоэффективных поверхностях стенок узких каналов и структурированных пластин. Демонстрируются результаты численных и физических исследований рациональных компоновок и выбора основных геометрических и режимных параметров для достижения высоких аэродинамических и теплофизических характеристик. Рассматривается разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 применительно к RANS расчетам интенсивных отрывных и закрученных потоков с использованием модификации SST-модели, учитывающей влияние кривизны линий тока.

Литература

- [1] Isaev S.A., Miao J.-J., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G., and Usachov A.E. Modeling the effect of wind shear on reducing the drag of an energy-efficient high-rise structure using the throttle effect // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2022. – Vol. 14, No.1. – P. 73–80.
- [2] Isaev S.A., Sudakov A.G., Nikushchenko D.V., Chung K.-M. Effect of compressibility on the trapped vortex in the gap between the coaxial disk and cylinder and the drag of their arrangement for axisymmetric sub-, trans-, and supersonic flow // *Fluid Dynamics*. – 2022. – Vol. 57, No.6. – P.820-829.
- [3] Su K.-C., Chung K.-M., and Isaev S. Separation control for a transonic convex corner flow using ramp-type vortex generators // *International Journal of Aerospace Engineering*. – 2022. – Article ID 4048490 (9).
- [4] Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2022. – №5. – С.13-24.
- [5] Isaev S., Nikushchenko D., Sudakov A., Tryaskin N., Iunakov L., Usachov A. and Kharchenko V. Numerical simulation of heat transfer enhancement in the paths of propulsion systems with single-row spherical and oval dimples on the wall // *Energies*. – Vol. 2022, No. 15. – P. 7198.
- [6] Isaev S., Leontiev A., Gritskevich M., Nikushchenko D., Guvernyuk S., Sudakov A., Chung K.-M., Tryaskin N., Zubin M., Sinyavin A. Development of energy efficient structured plates with zigzag arrangement of multirow inclined oval trench dimples // *Int. J. Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 184. – P. 107988.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ОБЛАСТЕЙ НОВОЙ ФАЗЫ В УПРУГОМ ТЕЛЕ

Кабанова П.К., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
kabanovapk@mail.ru, alexander.freidin@gmail.com

Использование функциональных материалов в элементах конструкций требует количественной оценки эффектов, вызванных фазовыми превращениями. В данной работе исследована задача об эволюции областей новой фазы в упругом теле, возникающих в результате фазовых превращений при деформировании. Фазовый переход сопровождается собственной деформацией превращения и изменением модулей упругости. Движение границы области – межфазной границы – описывается кинетическим уравнением, связывающим нормальную компоненту скорости границы с конфигурационной (термодинамической) силой, равной скачку нормальной компоненты тензора энергии-импульса Эшелби (см. обзорную статью [1]). Развита численная процедура, основанная на методе конечных элементов (см. также [2]). Аналитически решена задача о кинетике плоского слоя новой фазы, которая затем использована для верификации численной процедуры.

В результате численных экспериментов обнаружены различные сценарии эволюции области новой фазы. Вначале исследован случай однородного внешнего поля деформаций. Рассмотрены деформации, как допускающие, так и не допускающие существование равновесной двухфазной конфигурации. Показано, что область новой фазы сама может создавать концентрацию напряжений, способствующую дальнейшему фазовому превращению [3].

Затем рассмотрен рост области новой фазы в окрестности концентраторов напряжений в виде кругового и эллиптических отверстий, имеющих различные соотношения полуосей. Продемонстрировано, как концентратор напряжений может вызывать развитие области новой фазы при малых внешних деформациях, недостаточных для фазового перехода в однородном теле.

Построены распределения конфигурационной силы вдоль межфазных границ и показано, что эти распределения могут быть инструментом для предсказания особенностей развития областей. Исследовано, как форма отверстия и толщина слоя новой фазы влияют на распределение конфигурационной силы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П).

Литература

- [1] Freidin A.B., Vilchevskaya E.N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Altenbach H., Öchsner A. (eds) Encyclopedia of Continuum Mechanics. – Berlin: Springer, 2019.
- [2] Morozov A. Numerical and analytical studies of kinetics, equilibrium, and stability of the chemical reaction fronts in deformable solids. PhD Thesis, Technische Universität Berlin, 2021.
- [3] Кабанова П.К., Фрейдин А.Б. Численное исследование эволюции областей новой фазы в упругом теле. //Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 466-479.

ПРОГНОЗ СТЕПЕНИ СУРОВОСТИ ПОГОДЫ В ФЕВРАЛЕ 2019 ГОДА В ГОРОДЕ КРАСНОЯРСК ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ WRF

Калинин Н.А.^{1,2}, Быков А.В.^{1,2}, Ветров А.Л.¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

kalinin@psu.ru, blexx256@yandex.ru, vetrov@psu.ru

Зимняя суровость продолжает оказывать существенное влияние на условия труда и отдыха на территории Сибири. Представлен результат моделирования одного из существенных похолоданий в г. Красноярск с минимальной температурой воздуха ниже $-20,0^{\circ}\text{C}$ в период с 1 по 12 февраля 2019 г. 4 февраля была зафиксирована минимальная температура воздуха $-43,0^{\circ}\text{C}$. Незадолго до наступления пика похолодания произошло усиление ветра до 4 м/с при температуре ниже -30°C , что существенным образом усилило суровость погоды. Средняя минимальная температура за исследуемый период составила $-37,0^{\circ}\text{C}$, осадки отсутствовали, а высота снежного покрова не превышала 12 см.

Модель WRF-ARW версия 4.2.1 настроена на область расчета с центром в географических координатах 56° с.ш., 92° в.д. Использовались последовательно вложенные сетки. Первая – с шагом 9 км и областью расчета 333 на 333 узлов, вторая сетка – с шагом 3 км и областью расчета 400 на 400 узлов, третья – с шагом в 1 км и областью расчета 400 на 400 км. Модель использует 51 уровень по вертикали. Временной шаг вывода данных 1 ч. Временной шаг интегрирования адаптирован к размеру сетки. Модель использует следующие вычислительные процедуры: микрофизика облачности по схеме Томпсона, параметризация пограничного слоя по схеме, разработанной в университете Ионсей, коротковолновая и длинноволновая радиация по схеме Rapid Radiative Transfer Model, приземный слой по схеме Мони́на-Обухова. В качестве начальных и граничных условий использовались данные Global Forecast System (NCEP, США). Численный эксперимент включал 12 реализаций с расчетом прогностических полей на 27 ч вперед с 0 ч всемирного согласованного времени (совпадающего со временем по Гринвичу) в каждый из дней с 1 по 12 февраля.

В результате моделирования установлено, что модель воспроизводит волны холода и радиационное охлаждение в приземном слое атмосферы. Выявлены слои инверсий температуры и существенное влияние форм рельефа на распределение температуры. Зафиксированы территории с усилением ветра за счет влияния орографии. Прогноз температуры, скорости ветра и влажности воздуха подтвержден данными метеорологических и аэрологических наблюдений на сети Росгидромета РФ.

Для учета влияния мороза, влажности воздуха и усиления скорости ветра на возможности труда и отдыха в исследуемом периоде были рассчитаны индексы суровости: эффективная температура, эквивалентно-эффективная температура и индекс жесткости погоды по Бодману. Эффективная температура характеризует воздействие на человека температуры и влажности воздуха. Эквивалентно-эффективная температура является более полной биоклиматической характеристикой, поскольку учитывает влияние ветра. Если в эффективной и эквивалентно-эффективной температуре оценка теплового ощущения температуры наружного воздуха производится в основном за счет влажности, то в индексе жесткости погоды эффект теплоощущения и дискомфорта уточняется поправкой на скорость ветра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВОЙКО ИЗОГНУТЫХ ГИБКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ НАНОБОЛОЧЕК С РАВНОМЕРНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ И АНАЛИЗ ИХ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Калуцкий Л.А.¹, Крысько В.А.¹, Крысько А.В.¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск
leon199703@gmail.com, tak@san.ru, anton.krysko@gmail.com*

Построена математическая модель нелинейной статики и динамики двойко изогнутых функционально –градиентных оболочек с равномерной пористостью. При построении математической модели были приняты следующие гипотезы: гипотеза Кирхгофа-Лява; геометрическая нелинейность по теории Теодора фон Кармана, наноэффекты по модифицированной моментной теории упругости [1], пористость равномерная по толщине оболочки принята по теории Р. Phung-Van [2], функциональная градиентность состоит из керамики - диоксида циркония и металла - алюминия. Метод исследования – метод вариационных итераций [3] (расширенный метод Канторовича) доказательство сходимости которого дано в работе Крысько-Кириченко [4]. Эффективность этого метода приведена в работах [5,6]. Результаты полученные с помощью метода вариационных итераций хорошо согласуются с результатами полученными методом конечных элементов и метода Бубнова-Галёркина [7]. В работе исследуется напряжённо деформируемое состояние двойко изогнутых функционально-градиентных гибких прямоугольных в плане наноболочек с равномерной пористостью в зависимости от параметров кривизны, краевых условий, показателя пористости, нанопараметра, функционально-градиентного материального индекса.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского фонда №22-11-00160, <https://rscf.ru/project/22-11-00160>.

Литература

- [1] P. Phung-Van, C.H. Thai, H. Nguyen-Xuan, M. Abdel-Wahab, An isogeometric approach of static and free vibration analyses for porous FG nanoplates, *Eur. J. Mech. – A/Solids* 78 (2019) 103851.
- [2] Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C., Tong, P.: Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *Int. J. Solids Struct.* 39(10), 2731–2743 (2002)
- [3] Schunk TE (1933) Zur Knienfestigkeit schwach gekrummter zylindrischer Schalen. *Ing Arch* IV:394–414
- [4] Kirichenko VF, Krysko VA (1980) On the question of the solving of nonlinear boundary value problems by the Kantorovich-Vlasov method. *Difer Equ* 16(12):2186–2189.
- [5] Awrejcewicz, J., Kalutsky, L. A., Zhigalov, M. V., & Krysko, V. A. (2021). Review of the methods of transition from partial to ordinary differential equations: from macro-to nano-structural dynamics. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(7), 4781-4813.
- [6] Awrejcewicz, J., Krysko Jr, V. A., Kalutsky, L. A., & Krysko, V. A. (2022). Computing static behavior of flexible rectangular von Kármán plates in fast and reliable way. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 146, 104162.
- [7] Shahmohammadi, M. A., Abdollahi, P., & Salehipour, H. (2020). Geometrically nonlinear analysis of doubly curved imperfect shallow shells made of functionally graded carbon nanotube reinforced composite (FG_CNTRC). *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1-25.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Каменских А.А., Крысина А.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, anstasia_pankova@mail.ru, nastia.krycina@mail.ru

Прослойки из полимерных и композиционных материалов широко применяются для защиты элементов машин и конструкций от окружающей среды, внешних нагрузок, трения и т.д. Задачи о взаимодействии прослоек с элементами различных узлов моделируются в рамках механики контактного взаимодействия, при этом поведение конструкции во многом зависит от свойств материалов (физико-механические, фрикционные, реологические и т.д.), характера сопряжения (полированная поверхность, рваная резьба, склейка и т.д.) и геометрии прослойки (толщина, технологические углубления и т.д.). Анализ влияния характера сопряжения прослойки с телом может быть исследован на модельных задачах в рамках первого приближения.

В данной работе рассмотрена задача об индентиронии сферического штампа в стальное полупространство с полимерной защитной прослойкой. Рассматривается 7 материалов прослойки с разными механическими свойствами [1, 2]: чистый фторопласт, два композита на основе фторопласта армированные бронзовыми включениями разной геометрии, модифицированный γ -излучением фторопласт и три сверхвысокомолекулярных полиэтилена. В рамках моделирования выполнена верификация численного решения задачи с повторением решения задачи Герца. Выполнен анализ влияния степени дискретизации системы на решение. Рассматривается влияния характера сопряжения прослойка-полупространство на напряженно-деформированное состояние защитного слоя и параметры контактного взаимодействия штамп-прослойка и прослойка-полупространство. Реализовано три модели контакта на поверхности прослойка-полупространство: идеальный, полная адгезия и фрикционный. На границе сопряжения штамп-прослойка реализован фрикционный контакт с постоянным коэффициентом трения 0,04. Толщина прослойки варьировалась от 4 до 12 мм. Сила индентирования 1000 Н. Радиус сферического стального жесткого штампа 0,2 м.

В рамках исследования установлены зависимости параметров контакта и напряженно-деформированного состояния конструкции от толщины прослойки при разном характере сопряжения защитного слоя с полупространством. Установлено, что моделирование идеального контакта путем создания сетки узел в узел и единого по поверхности сопряжения прослойка-полупространство поля перемещений и напряжений значительно завышает параметры контакта поверхности сопряжения штамп-прослойка и интенсивности напряжений и деформаций для всех рассмотренных материалов полимерного слоя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

- [1] Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряжённого состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1 – С. 54 – 61.
- [2] Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifricition layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, № 2. – Art. 30.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНОЙ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Каменских А.А., Николаев А.В., Носов Ю.О., Аль-Раммахи А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

anna_kamenskih@mail.ru, nikolaev0811@mail.ru, ura.4132@yandex.ru,

nastena.boreckaya@mail.ru

В 2019 году ООО «Горные вентиляционные устройства» запатентовал новую шахтную вентиляционную перемычку [1]. Конструкция является быстровозводимой при аварийных ситуациях и изолирует участок шахты (рудника) от утечек воздуха или дымовых газов при возникновении пожара. Перемычка была создана с использованием методов компьютерного инжиниринга и прикладной механики, а также показала свою надежность на практике [2]. Вентиляционная перемычка состоит из каркаса, пневмоукупки и противопожарного полотна. В рамках численного моделирования контакта между вентиляционной перемычкой и горной породой установлено, что геометрия и материалы конструкции обеспечивают плотное прилегание поверхностей сопряжения перемычка-выработка, т.е. надежную изоляцию от проникновения воздуха или дымовых газов. Результаты исследования подтверждены на практике. Конструкция показала свою эффективность при испытаниях на калийном руднике БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» [3].

Согласно распоряжениям Правительства Российской Федерации № 2395-1 (ред. от 28.06.2022, с изм. от 14.07.2022) от 21 февраля 1992 г. «О недрах» актуальными являются исследования, направленные на изучение технологий ликвидации горных выработок, буровых скважин, а также иных сооружений. Для сохранения устойчивости земной поверхности, предотвращения выбросов газа и угля, снижения рисков возникновения подземных пожаров применяют технологию гидрозакладки [4]. При этом существующие изолирующие перемычки обладают рядом недостатков: трудность доставки и монтажа; одноразовое использование; хранение материалов, применяемых для возведения перемычки в шахтах и т.д. Разработанная и испытанная перемычка [1-3], ввиду своих высоких изоляционных свойств, быстровозводимости и возможности многократного использования может применяться при гидрозакладке. Но при проходке горных выработок геометрия их сечения может иметь значительно не каноническую форму, отличающуюся по всей протяженности ствола шахты или рудника. Технология гидрозакладки также может оказывать значительное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) перемычки. Таким образом, требуется дополнительное исследование конструкции. В рамках работы создана упрощенная модель несущего изоляционной перемычки, которая позволяет исследовать НДС конструкции при гидростатическом давлении в процессе гидрозакладки в рамках строительной механики. Выполнены исследования по анализу влияния сечения несущих балок каркаса на собственные формы и частоты колебания перемычки, а также параметры НДС.

Литература

- [1] Патент № 2713834 С1 Российская Федерация, МПК E21F 1/14. Шахтная вентиляционная перемычка: № 2019114578: заявл. 13.05.2019; опубл. 07.02.2020 / А.В. Николаев, В.А. Николаев, П.В. Максимов [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Горные вентиляционные устройства».
- [2] Клишин В.И., Николаев А.В., Максимов П.В. Расчёт шахтной вентиляционной перемычки нового типа и отдельных её элементов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 278-289.
- [3] Николаев А.В., Максимов П.В., Клишин В.И. Результаты испытания шахтной вентиляционной перемычки нового типа в добычном участке калийного рудника // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 79-84.
- [4] Журин С.Н., Зинченко А.В., Сергеев С.В., Фомин Б.А. Мониторинг взаимодействия бетонной перемычки с массивом гидрозакладки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 6. – С. 167-168.

АНАЛИЗ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАСТООБРАЗНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ В МОСТОСТРОЕНИИ

Каменских А.А., Носов Ю.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru

Опорные части являются несущими элементами мостостроительных конструкций. Выделяют достаточно большое число конфигураций [1], при этом достаточно широкое распространение получили сферические и резиновые опорные части. Такие конструкции воспринимают силовые нагрузки от мостового пролета: горизонтальные, вертикальные, циклические. На их работу оказывают значительное влияние внешние факторы, связанные с окружающей средой (температура, ветер, влага и т.д.), а также материалы, из которых изготавливают узлы, и их термомеханические свойства.

В сферических опорных частях мостов эффективное функционирование конструкции зависит от полимерных антифрикционных и смазочных материалов слоев скольжения [1]. В конструкции используются пастообразные смазки, например ЦИАТИМ-221, ЦИАТИМ-221F, ТОМФЛОН СБС 240 FM, ТОМФЛОН СК 170 FH и др. Для математического моделирования поведения сферических опорных частей требуются модели, описывающие поведение смазочных материалов в широком диапазоне температур. В данной работе рассмотрена процедура идентификации свойств смазок на основе серии натуральных экспериментов по определению физико-механических и реологических характеристик материалов.

В рамках первого этапа исследования разработана программа испытаний смазочных материалов для определения зависимости касательного напряжения и вязкости от температуры и скорости сдвига, а также теплофизических свойств. Отработана и скорректирована программа испытаний на смазочном материале ЦИАТИМ-221. Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории пластмасс ПНИПУ. Выполнена обработка и анализ результатов, получены зависимости, необходимые для описания поведения смазки в широком диапазоне температур. Установлено, что смазочный материал обладает вязкоупругопластическими свойствами.

Ранее была построена процедура для идентификации математической модели поведения смазки в рамках вязко упругости с использованием уравнений максвелловского типа и рядов PRONY, основанная на литературных данных [2]. На втором этапе исследования выполнено уточнение процедуры численной идентификации свойств смазки и расширение функционала процедуры на описание материала с использованием модели ANAND. Процедура численной идентификации выполнена с использованием метода многопараметрической оптимизации Нелдера-Мида.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01313.

Литература

- [1] Nosov Yu.O., Kamenskikh A.A. Influence analysis of lubricant recesses on the working capacity of the bridge span spherical bearing // Lubricants. – 2022. – Vol. 10(11). – Art. 283.
- [2] Каменских А.А., Носов Ю.О. Численная идентификация реологических свойств смазочного материала // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XXXI Всероссийской школы-конференции. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022. – С. 141-144.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ ЗАПОЛНЕНИЯ УГЛУБЛЕНИЯМИ ПОД СМАЗКУ

Каменских А.А., Носов Ю.О., Струкова В.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru, veloiv_pstu@mail.ru

Мостостроительные компании выделяют ряд актуальных задач связанных с конструкционным оформлением контактных узлов опорных частей мостов [1]. Актуальна задача анализа влияния геометрической конфигурации элементов на работу конструкции: толщина полимерной прослойки, вид углублений под смазку, количество смазочного материала в слое скольжения и т.д. При этом применение численного анализа работоспособности конструкции [2] позволяет не только уменьшить временные затраты на исследования, но и экономические. В данной работе выполнено моделирование одной из задач современного мостостроения, связанной с анализом влияния схемы заполнения сферического слоя скольжения углублениями под смазочный материал на деформационное поведение конструкции. На рисунке представлена численная модель: сферический слой скольжения с углублениями под смазку взаимодействует с двумя стальными плитами.

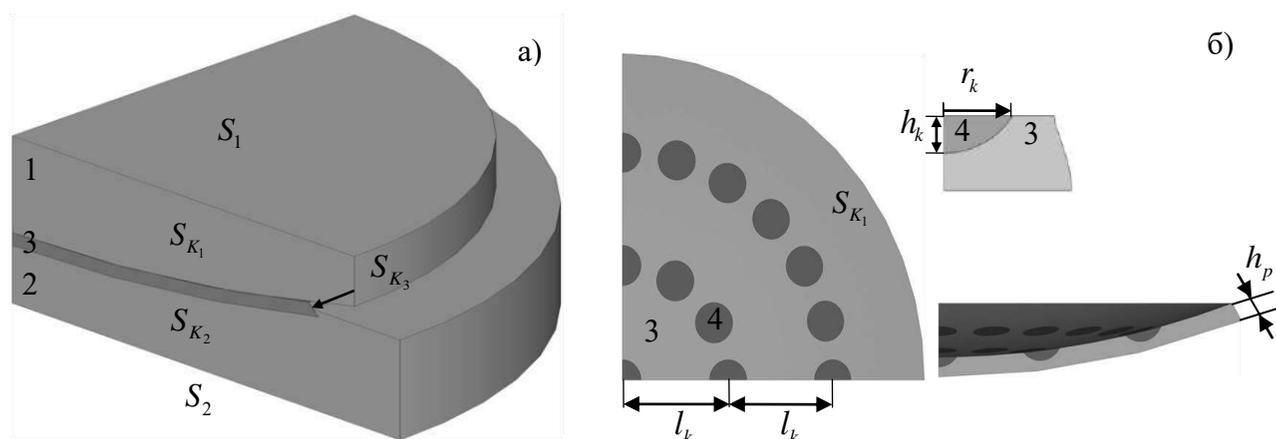


Рисунок – Сферическая опорная часть: а) упрощенная расчетная схема; б) сферический слой с углублениями под смазочный материал; 1, 2 – верхняя и нижняя стальные плиты;

3 – полимерная прослойка; 4 – углубления под смазку

На работоспособность конструкции влияет количество смазки и схема заполнения слоя скольжения углублениями. Расстояние между рядами углублений под смазочный материал l_k принимают значения в диапазоне 9-28 мм. Проведен анализ влияния схемы заполнения сферического слоя скольжения лунками под смазку. Построены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния и зон контакта от l_k .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01313.

Литература

- [1] Nosov Yu.O., Kamenskikh A.A. Influence analysis of lubricant recesses on the working capacity of the bridge span spherical bearing // Lubricants. – 2022. – Vol. 10(11). – Art. 283.
[2] Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P., Strukova V.I. Comparative Analysis of the Work of Bridge Spherical Bearing at Different Antifriction Layer Locations // Lubricants. – 2022. – Vol. 10(9). – Art. 207.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНТАКТНОГО УЗЛА ОПОРНОЙ ЧАСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК ОТ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА

Каменских А.А., Панькова А.П.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, anastasia_pankova@mail.ru

Нагрузка на элементы транспортно-логистических систем возрастает с каждым годом из-за высоких темпов урбанизации территорий. Опорные части мостов являются одними из основных элементов транспортных систем, которые воспринимают различные нагрузки и их сочетания от мостового пролета. ООО «АльфаТех» (г. Пермь, Россия) была поставлена задача об исследовании влияния геометрических и физико-механических характеристик слоя скольжения на деформационное поведение сферических опорных частей мостов (рис. 1) с целью увеличения несущей способности и безремонтных сроков работы конструкции.

Ранее проводились исследования поведения конструкции под влиянием только вертикальной нагрузки от мостового пролета при разной геометрии и материале слоя скольжения [1]. Однако для получения более точной картины деформационного поведения контактного узла необходимо рассмотреть комплексное влияние вертикальной и горизонтальной нагрузок от пролетного строения моста, а в дальнейшем и влияние циклического нагружения.

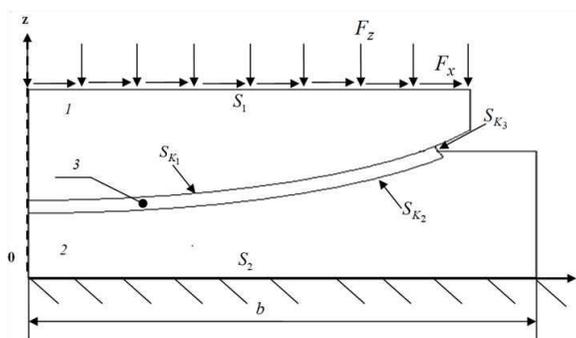


Рисунок 1 – Модель опорной части

В работе рассмотрена сферическая опорная часть, рассчитанная на вертикальное давление до 54 МПа и горизонтальную нагрузку до 7 МПа. Геометрические характеристики контактного узла: максимальная высота верхней плиты и максимальная ширина конструкции равны $h_1 = 30$ мм и $b_k = 2b = 155$ мм соответственно; толщина антифрикционной полимерной прослойки h_p варьируется от 4 до 12 мм; минимальная высота нижней плиты со сферическим вырезом зависимости от толщины прослойки $h_2 = 20 \div 14$ мм. В рамках первого приближения в качестве материала слоя скольжения рассмотрен модифицированный фторопласт [1].

В рамках исследования выполнена рационализация конечно-элементного разбиения конструкции с целью экономии вычислительных ресурсов без потери качества решения. Получены новые качественные и количественные зависимости изменения параметров контакта и деформационных характеристик прослойки от геометрических параметров системы. Выполнено сравнение контактного взаимодействия конструкции с учетом и без учета горизонтальной нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01313.

Литература

[1] Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P., Strukova V.I. Comparative analysis of the work of bridge spherical bearing at different antifriction layer locations // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, № 9. – Art. 207.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВАСКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ IN-VIVO: ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И КОГЕРЕНТНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ

Камшилин А.А.

*Институт автоматизи и процессов управления ДВО Российской Академии
наук, Владивосток*

*Северо-западный областной научно-клинический центр им. Л.Г. Соколова ФМБА России,
Санкт-Петербург
alexei.kamshilin@yandex.ru*

Многие социально-значимые заболевания сопровождаются нарушениями регуляции системной гемодинамики и микроциркуляции. Микроциркуляция отвечает за осуществление жизненно важных метаболических процессов, включая снабжение тканей кислородом. Поэтому разработка надежных и чувствительных измерительных систем параметров кровотока чрезвычайно важно для диагностики ранних стадий заболеваний, оптимизации тактики ведения пациентов и контроля эффективности терапии, изучения патогенеза и разработки новых методов лечения. Поскольку живые организмы являются очень высоко чувствительными к любым внешним воздействиям, то измерительные системы должны быть прежде всего бесконтактными и неинвазивными. Этому требованию отвечают оптические методы, в которые входят лазерная доплеровская флоуметрия, лазерная спекл-контрастная визуализация, флуоресцентная ангиография, визуализирующая фотоплетизмография, спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона, гиперспектральная визуализация, инфракрасная термографическая визуализация и оптическая когерентная термография. Несмотря на длительное и активное изучение этих методов, основной фундаментальный вопрос о взаимодействии света с живой биологической тканью, содержащей кровеносные сосуды, остаётся пока недостаточно глубоко проработанным. Неоспоримым является факт, что одним из результатов такого взаимодействия является модуляция интенсивности света во времени с частотой сердечных сокращений. Однако, причины этой модуляции до сих пор остаются предметом обсуждения. В этой лекции будут представлены экспериментальные факты, которые не находят объяснений в рамках традиционной модели. В частности, почему наибольшая модуляция наблюдается при освещении зелёным светом, который не взаимодействует с пульсирующими сосудами. Также будет обсуждено влияние когерентности света на отношение сигнал / шум при получении информации о функционировании васкулярной системы. Будут приведены примеры использования оптических методов как для диагностики гемодинамических процессов, так и для интраоперационного мониторинга перфузии тканей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-15-00265.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МАГНИЯ В ПЕЧИ ТИТАНОВОГО РЕАКТОРА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТИВНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Карасев Т.О.¹, Перминов А.В.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
karasev.t@icmm.ru, perminov1973@mail.ru

Исследовалась задача конвекции жидкого магния в цилиндрической реторте печи титанового реактора. На формирование структуры конвективного течения существенное влияние оказывает неравномерное распределение тепловых потоков на боковой поверхности реторты [1]. Для корректного учета потоков тепла необходимо решение задачи сопряженного теплового обмена между жидким магнием, стальной ретортой и зоной воздушного охлаждения печи титанового реактора. Рассматривались две задачи сопряженного тепломассопереноса в полной и сокращенной постановках. В первом случае возникает необходимость моделирования полной сопряженной задачи, включающей в себя расплав магния, стенку реторты, зазор охлаждения, где прокачивается воздух, и стенку аппарата, где расположены нагревательные элементы. Вторая постановка исключает из модели воздушный зазор и внешнюю стенку аппарата. На внешней поверхности реторты с расплавленным магнием ставятся эффективные тепловые граничные условия, куда в явном виде входит коэффициент теплоотдачи [2] и слагаемое, отвечающее передаче тепла посредством излучения от нагревательных элементов к реторте.

Рассматривались конфигурации нагрева аппарата, когда тепло в систему поступает от химической реакции $Q_{Mg} = 205$ кВт и боковых электропечей $Q_{hs} = 329$ кВт. В полной постановке для уравнения переноса тепла применялись граничные условия второго рода.

При переходе к эффективным граничным условиям необходимо использовать условия Робина $\lambda_{steel} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{Or} = q_{conv} + q_{rad}$, куда входит конвекционная $q_{conv} = \lambda_{air} / H_{air} \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} S(L)(T_{Wall} - T_{air})$

и радиационная $q_{rad} = C_{rad} Q_{hs} / S_{Wall}$ части.

В ходе расчетов были определены поля скорости и температуры магния для различных скоростей обдува. При невысоких скоростях подачи воздуха формируется двух вихревое течение с максимальной скоростью 0.027 м/с. Дальнейшее увеличение скорости воздуха формирует более интенсивное одно вихревое течение. Найдены коэффициенты C_s и C_b , входящие в C_{rad} , для всех режимов обдува. При скорости воздуха 3 м/с они близки к 0.6 и 0.3, а для более интенсивных режимов обдува стремятся к 0.1. Наибольшее расхождение результатов двух моделей составило 15%. Использование модели с эффективными граничными условиями значительно ускоряет процесс счета. Изучено влияние коэффициентов C_s и C_b на тепловое и гидродинамическое поведение системы. Получены карты конвективных течений магния в зависимости от значений этих коэффициентов и определены их значения, при которых происходит изменение структуры течения.

Литература

[1] Карасев Т.О., Теймуразов А.С. Моделирование турбулентной конвекции жидкого магния в аппарате восстановления титана в рамках подходов RANS и LES. // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т.12. №4. С.353-365. <https://doi.org/https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.4.30>

[2] Карасев Т., Перминов А. В. Моделирование тепловых режимов в канале воздушного охлаждения аппарата восстановления титана. Вестник Пермского университета. Физика, (4), 39–51. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2021-4-39-51c>.

РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МОДЕЛЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ВЯЗКОСТИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ

Карасева У.П.¹, Фрейдин А.Б.¹

¹Институт проблем машиноведения Российской академии наук

Санкт-Петербург, Россия

u.p.karaseva@gmail.com, alexander.freidin@gmail.com

Рассмотрены модели вязкости с изменяющимся коэффициентом вязкости, зависящим от напряжений или от структурной температуры. Примерами материалов, вязкость которых зависит от напряжений, являются диоксид кремния, появление которого исследовалось в реакциях окисления кремния [1], или литизированный кремний, возникающий в литий-ионных батареях (см., напр., [2]). Релаксирующие напряжения при этом могут влиять через инварианты тензора напряжений или комбинации инвариантов (см. также [3]). Релаксационные свойства наполненных вулканизаторов моделируются зависимостью коэффициента вязкости от меры деформации [4]. При моделировании реакции отверждения препрега использовалась модель, в которой вязкость высококонцентрированных суспензий зависит от концентрации твердых веществ и распределения частиц по размерам [5, 6].

Причиной изменения вязкости стеклообразных материалов является неравновесность микроструктуры, которая, меняясь сама, меняет коэффициент вязкости, который зависит от времени через зависимость от параметров микроструктуры. Для описания таких явлений было введено понятие структурной (фиктивной) температуры, характеризующей степень неравновесности. Были предложены уравнения для описания эволюции фиктивной температуры и зависимости вязкости от фиктивной температуры (см., напр., [7]).

В данном докладе для демонстрации релаксации напряжений в различных моделях в качестве реологической модели использовался материал Пойнтинга–Томпсона (“стандартная модель”) [8] в условиях растяжения и сжатия. Была исследована разница в поведении моделей при растяжении и сжатии и влияние инвариантов тензора напряжений на вязкость (см. также [9]). Кривые релаксации напряжений сравнивались с соответствующими кривыми релаксации в модели с постоянной вязкостью.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П)

Литература

- [1] Kao D.-B., McVittie J.P., Nix W.D., Saraswat K.C. Two-dimensional thermal oxidation of silicon. II. Modeling stress effects in wet oxides // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1988. – Vol. 35. – P. 25-37.
- [2] McDowell M. T., Lee S. W., Nix W. D., Cui Y. (2013). 25th anniversary article: Understanding the lithiation of silicon and other alloying anodes for lithium-ion batteries. *Advanced Materials*, 25(36), 4966–4984.
- [3] Poluektov M., Freidin A.B., Figiel Ł. Modelling stress-affected chemical reactions in non-linear viscoelastic solids with application to lithiation reaction in spherical Si particles // *International Journal of Engineering Science*. – 2018. – Vol. 128. – P. 44-62.
- [4] Солодько В.Н., Свистков А.Л., Пелевин А.Г. Численное моделирование вязкоупругого поведения наполненных вулканизаторов. *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 115–121.
- [5] Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheology of concentrated suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 1971, vol. 15, pp. 2007–2021.
- [6] Свистков А. Л., Елисева А. Ю., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2019. № 1. С. 9–16.
- [7] Mauro J. C., Allan D. C., Potuzak M. Nonequilibrium viscosity of glass. *Phys. Rev. B* 80. 094204 (2009).
- [8] Рейнер М. Реология. М: Наука. 1965. 224 с.
- [9] Карасева У.П., Фрейдин А.Б. Сравнительный анализ релаксации напряжений в линейной и нелинейных моделях вязкости. *Неделя науки ФизМех. Сборник статей Всероссийской научной конференции 4-9 апреля 2022 года*. Санкт-Петербург. Политех-Пресс. (2022 г.) 199-202 с.

ВЛИЯНИЕ УГЛА РАСТВОРА И СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ НА ЗАХВАТ ВОЗДУХА ПРИ СОУДАРЕНИИ КОНУСА С ЖИДКОСТЬЮ

Карра Ж.-Б.¹, Гаврилов Н.В.¹, Черданцев А.В.², Шмакова Н.Д.¹, Ерманюк Е.В.¹

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

jb.carrat@gmail.com

При соударении твердого тела с жидкостью (либо жидких капель с твердым телом) возникает возможность формирования и последующего схлопывания воздушной полости в зоне начального контакта. Подобный эффект приводит к возникновению дефектов (воздушных пузырьков) при нанесении покрытий, а также к неравномерному охлаждению в ряде прикладных задачах. В настоящей экспериментальной работе исследована задача о соударении тупого конуса из нержавеющей стали диаметром 180 мм с различным углом раствора (2° , 3° , 4° и 5° по отношению к плоскости основания) со свободной поверхностью глубокой жидкости (вода или 2.5% раствор бутанола) в диапазоне скоростей от 13 до 190 мм/с. В зависимости от скорости и угла раствора наблюдаются четыре вида результатов схлопывания воздушной каверны: одиночный пузырек воздуха в вершине конуса, несколько пузырьков вблизи вершины конуса, нерегулярная дорожка из пузырьков, регулярное полигональное кольцо из пузырьков.

Для визуализации процесса соударения тела с жидкостью используется эффект полного внутреннего отражения (TIR) [1]. При использовании этого метода возникает значительный контраст изображений между зонами, отвечающими свободной поверхности жидкости и смоченной поверхностью конуса. Внешний и внутренний диаметры зоны контакта оцениваются для каждого кадра, причем для аппроксимации внешнего и внутреннего диаметров как функции времени используется линейная и экспоненциальная [2] зависимости, соответственно. Точка пересечения этих кривых дает оценку начального диаметра зоны контакта. При скоростях соударения больше 60 мм/с скорость движения внешней границы зоны контакта прямо пропорциональна скорости движения виртуального радиуса пересечения поверхности конуса с невозмущенной свободной поверхностью жидкости с коэффициентом пропорциональности 1.35.

Соотношение скейлинга (для случая сферической геометрии описано в [3, 4]), основанное на балансе давлений, обусловленных силами инерции жидкости и эффектом смазки в тонком воздушном слое, предполагает универсальную зависимость между начальным радиусом воздушного диска и теоретическим параметром, учитывающим динамическую вязкость воздуха, плотность жидкости, скорость погружения и угол раствора конуса. В настоящей работе показано, что начальные радиусы воздушного диска ложатся на универсальную зависимость от полученного теоретического параметра для обеих жидкостей в изученном диапазоне скоростей удара и углов раствора конуса.

Литература

- [1] Jain, U., Gauthier, A., van Der Meer, D. Total-Internal-Reflection Deflectometry for Measuring Small Deflections of a Fluid Surface // *Experiments in Fluids* 2005 V. 62 P. 235
- [2] Thoroddsen, S. T., Etoh, T. G., Takehara K., Ootsuka N., Hatsuki Y. The Air Bubble Entrapped under a Drop Impacting on a Solid Surface // *Journal of Fluid Mechanics* 2005. V. 545. P. 203.
- [3] Hicks, P. D., Ermanyuk E. V., Gavrilov N. V., Purvis R. Air Trapping at Impact of a Rigid Sphere onto a Liquid // *Journal of Fluid Mechanics* 2012 V. 695. P. 310–320.
- [4] Josserand C., Thoroddsen S.T. Drop impact on a solid surface // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2016. V. 48. P. 365–91.

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЯДА НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ С КОНТАКТНЫМИ ДАВЛЕНИЯМИ СВЫШЕ 60 МПА

Келлер И.Э.¹, Адамов А.А.¹, Петухов Д.С.¹, Кузьминых В.С.², Патраков И.М.³, Острер С.Г.³, Гракович П.Н.⁴, Шилько И.С.⁴

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

³ *ООО «АльфаТех», Пермь*

⁴ *Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель*

kie@icmm.ru, adamov@icmm.ru

Нормы РЖД и Росавтодора по оценке пригодности композитных полимерных материалов в качестве антифрикционных слоёв сферических шарниров опираются на зарубежные методики испытаний, не реализованные на территории России. Материал антифрикционных слоёв изделий, проектируемых и производимых на предприятии ООО «АльфаТех» (г. Пермь), испытывает реверсивное скольжение по контртелу при контактных давлениях свыше 60 МПа и должен выполнять свои функции 50 лет без существенного износа, что делает его ответственной и высокотехнологичной составляющей конструкции. Для выбора подходящего материала разрабатывается методика и средства испытаний, обеспечивающие корректный сравнительный анализ ряда наполненных композитов на основе ПТФЭ.

Были проведены испытания для определения коэффициентов трения при комнатной температуре и различных уровнях контактного давления до 60 МПа двенадцати антифрикционных полимерных композитов, показавших лучшие механические характеристики в предварительных испытаниях. Методика механических испытаний, критерии качества материалов и результаты для части материалов приведены в [1]. Использована установка MTS 316 с вертикальным и горизонтальным гидроприводами и оригинальным модулем, позволяющим определять коэффициенты трения покоя и скольжения при реверсивном скольжении образца по полированной нержавеющей стали без смазки и со смазкой. Изготовлены образцы-диски с лунками для смазки, как в антифрикционных слоях опорных частей с шаровым сегментом, испытанные в соответствии с техническими требованиями РЖД.

Для испытаний на износостойкость при комнатной температуре использована установка реверсивного трения по схеме «плоскость по плоскости» в паре трения с полированной нержавеющей стали со смазкой для контактных давлений 45-65 МПа, сконструированная на ООО «АльфаТех» [2]. Образцы имели прямоугольную форму с лунками для смазки. Проводились допускаемые требованиями РЖД экспресс-испытания износостойкости на базе 500-2000 м накопленного смещения в паре трения. Для испытаний при пониженных температурах проектируется новая испытательная машина.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596012.

Литература

[1] Adamov A.A., Keller I.E., Ostrer S.G., Seletkov D.V. Evaluation of the Performance of Antifriction PTFE Composites at a Pressure Over 60 МПа. I. Comparison of Their Hardness and Deformation Properties Under Free and Constrained Compression // Mech. Compos. Mater. – 2022. – Vol. 58. – P. 673–688.

[2] Пат. RU 2692130 С2. Испытательная установка реверсивного трения / Ипанов А. С., Адамов А. А., Светлаков А. В., Василенко В. Д., Патраков И. М., Непеин И. В. — Заявлено 24.10.2017 // 2019. — Бюл. № 18.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАЗМЯГЧЕНИЯ МАЛЛИНЗА В РАВНОВЕСНОМ И ДИССИПАТИВНОМ СЛАГАЕМЫХ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ КОШИ

Кислицын В.Д.¹, Шадрин В.В.¹, Свистков А.Л.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
kislitsyn.v@icmm.ru, shadrin@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

В подавляющем большинстве работ эффект размягчения Маллинза моделируется лишь в равновесном слагаемом тензора напряжений Коши. В данной работе предлагается учитывать эффект размягчения также и в диссипативном слагаемом тензора напряжений. Для этого используется обобщение математической модели, за основу которой взята модель, описанная в работе [1].

Для диссипативного слагаемого тензора напряжений используется уравнение эволюции во времени, в которое входят две неотрицательные функции параметров состояния среды. Одним из данных параметров является время релаксации материала, для которого также было введено уравнение эволюции во времени. Таким образом, для этапов первого нагружения и для последующего деформирования уже размягченного материала использовались различные численные значения времени релаксации, связь между которыми устанавливается введенным для времени релаксации специальным переходным уравнением эволюции. Вместе с этим функции параметров состояния среды зависят от максимальной кратности удлинения среды. Данные зависимости описываются аппроксимирующими формулами.

Для моделирования упругих свойств материала с учетом эффекта размягчения Маллинза использовался упругий потенциал, в основе которого положено представление об эффективном поведении нагруженных полимерных цепей. Используемая модель упругого поведения позволяет учитывать связь макроскопических деформаций с эффективной деформацией активных полимерных цепей.

В рамках работы были осуществлены циклические эксперименты с возрастающей амплитудой деформирования и продолжительными остановками перед сменой направления движения захватов. Такие испытания дают возможность отследить степень размягчения материала в ходе нагружения и рост диссипативных потерь для разных кратностей удлинений. Испытания проводились с образцами полимерных нанокомпозитов, связующим которых являлся полиуретан на основе форполимера СКУ-ППЛ-2102. В работе рассмотрены образцы ненаполненного полиуретана и полиуретана с наполнителем в количестве 0.5 массовых частей. В качестве наполнителя был использован малослойный графен, полученный из биополимеров по СВС технологии (самораспространяющегося высокотемпературного синтеза), разработанной в ФГУП НИИСК.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7).

Литература

[1] Kislitsyn V.D., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Shadrin V.V. Determination of the inelastic behavior of viscoelastic materials using the new thermodynamic model // AIP Conference Proceedings. – 2022. В печати

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА-ПУАЗЕЙЛЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Князев Д.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
dvk@icmm.ru*

Рассматриваются установившиеся осесимметричные течения несжимаемой ньютоновской жидкости с коэффициентом вязкости, зависящим от температуры, в цилиндрической трубе и зазоре между коаксиальными цилиндрами. Движение среды индуцируется продольными градиентами давления и температуры, а также перемещением границ области течения. Предполагается, что коэффициент динамической вязкости и температура связаны экспоненциальным или степенным законом. В рамках обычных для течений Куэтта-Пуазейля допущений осевая и азимутальная составляющие скорости предполагаются функциями только радиальной координаты. Рассмотрены течения с линейной и экспоненциальной зависимостью температуры от продольной координаты. В обоих случаях уравнения гидродинамики термовязкой жидкости удалось редуцировать к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и дважды её проинтегрировать. В результате задача сведена к уравнению третьего порядка для некоторой величины, определяющей радиальное распределение температуры. После её нахождения остальные неизвестные вычисляются с помощью квадратур. В частности получено явное выражение для компоненты σ_{zr} тензора вязких напряжений. Показано, что для течения с линейно изменяющейся вдоль оси симметрии температурой расход жидкости определяется балансом тепловых потоков через границы области течения. Изучено влияние безразмерных комплексов задачи на характер её решений. Выполнено сравнение полученных результатов с известными решениями с постоянным коэффициентом вязкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 121031700169-1).

ДВИЖЕНИЕ ЛЕГКОЙ СВОБОДНОЙ СФЕРЫ И ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Козлов В.Г.¹, Звягинцева Е.А.¹, Кудымова Е.М.¹, Романец В.Я.¹

¹ Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
kozlov@pspu.ru, zvyagintsevat@gmail.com, kudymovakat@gmail.com,
v.romanetz2000@gmail.com

Экспериментально изучается движение жидкости во вращающемся вертикальном цилиндре, возбуждаемое легким сферическим телом, всплывающим вдоль оси полости. Эксперименты выполняются при быстром вращении, когда центробежная сила позиционирует тело на оси вращения, а действие силы Кориолиса является определяющим [1]. Методом скоростной видеорегистрации исследуется поведение тела в зависимости от частоты вращения и вязкости жидкости. Методом PIV исследуются поля скорости жидкости. Показано, что в системе отсчета полости тело возбуждает движение в форме столбика Тейлора – Праудмена, диаметр которого согласуется с диаметром тела. В верхней (фронтальной) части столбика жидкость совершает отстающее дифференциальное вращение, в нижней – опережающее. За пределами столбика дифференциальное вращение жидкости практически отсутствует. Обнаружено, что поле азимутальной скорости в поперечном сечении столбиков практически не изменяется по их длине, в то же время интенсивность вращения столбиков зависит от их длины (рис.1), в результате чего тело одновременно с поступательным движением вдоль оси совершает собственное дифференциальное вращение: в нижней части полости – опережающее, в верхней – отстающее. Интенсивность дифференциального вращения тела изменяется с продольной координатой по линейному закону и понижается с повышением безразмерной скорости вращения.

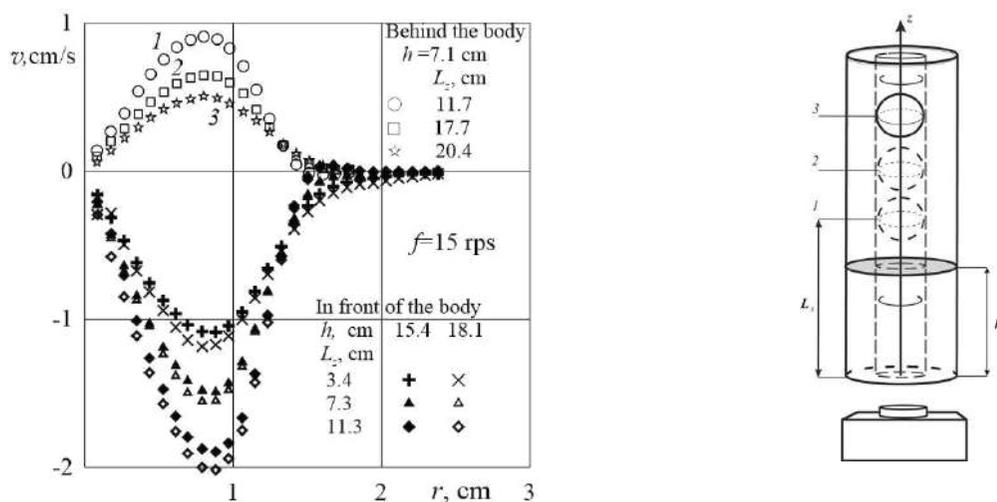


Рис.1. Тангенциальная скорость дифференциального движения жидкости в зависимости от расстояния до оси вращения в разных по высоте сечениях при различном положении тела в полости; справа – схема измерения поля скорости в столбике позади всплывающего тела.

Литература

[1] Taylor G.I. Motion of Solids in Fluids when the Flow is not Irrotational – London, 1916. – 408 с.

ИЗУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДНО-МАСЛЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Козлов Н.В.¹, Мизёв А.И.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kozlov.n@icmm.ru*

Экспериментально изучается динамика водно-масляной эмульсии под действием ультразвукового поля. Реактор сконструирован как акустический резонатор, между излучающей и отражающей стенками которого помещается рабочая жидкость. В экспериментах применяется загрузочный режим работы реактора. УЗ излучение направлено вдоль горизонтальной оси. Динамика эмульсии изучается по картине, формирующейся в проходящем через жидкость свете на сенсоре КМОП-камеры. Измеряется яркость изображений (уровень серого). По мере оседания дисперсной фазы картина постепенно изменяется. Обнаружено, что при действии ультразвукового излучения ряд характеристик, ассоциирующихся с перераспределением массы жидкостей, изменяется быстрее, чем в случае гравитационного осаждения. Данный результат указывает на интенсификацию разделения эмульсии. Величина интенсификации немонотонно зависит от интенсивности УЗ излучения, что качественно согласуется с известными результатами других работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Пермского края (грант 20-41-596009).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

Козлов Н.В.^{1,2}, Мошева Е.А.^{1,2}, Панькова Н.В.¹

¹Пермский государственный технический университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

kozlov.n@icmm.ru

Экспериментально изучается неустойчивость горизонтальной границы двух смешивающихся жидкостей при тангенциальных вибрациях контейнера. В качестве пар рабочих жидкостей используются следующие: «вода – водный раствор глицерина 90%», 10% и 50% растворы изопропилового спирта, 6% раствор HNO₃—17% раствор NaOH. Вибрации вызывают формирование квази-стационарного рельефа на линии контакта растворов.

Сформировавшийся рельеф занимает среднюю часть границы раздела, за исключением пристеночных областей, и его протяжённость уменьшается при понижении интенсивности вибраций. В проведённых экспериментах динамика рельефа имеет нестационарный характер: гребни находятся в непрерывном перестроении. На начальной стадии их амплитуда и длина волны возрастают. Затем, по достижении определённого размера гребни разбегаются из центральной части в направлении стенок, при этом их размер колеблется: периодически большой гребень разделяется на два маленьких, которые затем вырастают.

При протекании химической реакции время жизни рельефа сокращается. Сформировавшиеся пилообразные гребни испытывают вторичную неустойчивость, напоминающую по виду параметрический резонанс, что приводит к их искажению. В области, соответствующей высоте рельефа, формируется зона смешения, превосходящая по своей ширине, диффузионную зону, формирующуюся за то же время в отсутствие вибраций. При повышении интенсивности вибраций помимо квазистационарного рельефа на границе слоёв формируются два новых вида неустойчивости, локализованные внутри зоны смешения, остающейся после рельефа. Первый из них – это коротковолновая рябь вблизи стенок, второй – регулярные структуры в средней ширине слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-11-00133).

МАГНИТНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МИКРОПРОВОДОВ

Колесникова В.Г.¹, Андреев Н.В.^{1,2}, Омельянчик А.С.¹, Солдатов И.В.³, Шаффер Р.³,
Родионова В.В.¹

¹Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта, Калининград

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

³Институт исследования твердого тела и материалов им. Лейбница в Дрездене

Микромасштабные магнитные провода с цилиндрической симметрией обладают уникальными магнитными свойствами благодаря процессу изготовления Улитовского-Тейлора [1]. Среди преимуществ, микропровода обладают возможностью изменять магнитные свойства как за счет изменения начальных технических параметров, так и за счет изменения внешних факторов (дополнительные напряжения, нагрев, пр.). В результате ферромагнитные микропровода находят применение в системах контроля безопасности и кодирования, чувствительных датчиках магнитных полей, механических напряжений, температур, деформаций, а также в микроэлектронике и медицинских приложениях [2, 3]. Приложения, в большинстве, основаны на материалах с аморфной структурой. Эти материалы трудно изучать даже с помощью рентгеновских методов. В то же время недавно было показано, что наличие нескольких магнитных фаз также представляет потенциальный интерес для современных приложений [4, 5]. Понимание магнитных взаимодействий в аморфных и многофазных магнитных проводах поможет повысить эффективность связанных устройств на основе таких образцов.

В данной работе исследуются магнитные и структурные особенности ферромагнитных микропроводов с аморфной и частично кристаллизованной металлической жилой. Были исследованы микропровода из сплавов на основе Fe, FeCo и Co. Структурные свойства были исследованы методами XRD и HRTEM. Фазовые превращения были изучены и проанализированы с помощью дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК). ДСК-анализ в совокупности с модифицированным термогравиметрическим анализом показал, что процессы кристаллизации и рекристаллизации в металлической жиле происходят с образованием метастабильных магнитных фаз. Магнитные свойства микропроводов были исследованы с помощью вибрационной магнитометрии, также для обнаружения магнитных особенностей в многофазных проводах был использован метод FORC-анализа (кривая обращения первого порядка). FORC-анализ был применен для обнаружения взаимодействий между магнитными фазами, а также помог проследить их влияние на процесс перемагничивания. Такой анализ дал возможность проанализировать взаимосвязь между магнитоупругим и магнитостатическим взаимодействиями.

Данное исследование было поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта».

Литература

- [1] Mitxelena-Iribarren O. et. al, Glass-coated ferromagnetic microwire-induced magnetic hyperthermia for in vitro cancer cell treatment // Mater. Sci. Eng. – 2020. – С. 106. – P. 110261.
- [2] Baraban I. et al, Effect of glass-removal on the magnetostriction and magnetic switching properties in amorphous FeSiB microwires // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – V. 481. – P. 50–54.
- [3] Vega V. et al // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112. – P. 033905.
- [4] Badini-Confalonieri G.A., et al. Biased magnetization reversal in bi-phase multilayer microwires // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008. – V. 320, 20. – P. 2443-2450.
- [5] Torrejón J. et al. Optimization of magnetoelastic temperature sensor based on multilayer microwires // Sensor Letters. – 2009. – Т. 7. – №. 3. – С. 236-239.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАСОСА

Колесниченко И.В., Халилов Р.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

khalilov@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Жидкие металлы, применяемые в качестве теплоносителей в атомных реакторах на быстрых нейтронах, химически активны [1]. Состав примесей, присутствующих в исходном металле, например, натрия, и появляющихся в процессе эксплуатации установок, разнообразен. Основной целью работы является решение проблемы разработки новых методов оперативного измерения физических свойств жидкометаллического теплоносителя [1]. Имеющиеся системы контроля свойств как правило совмещены с системами очистки жидкометаллического теплоносителя от нежелательных примесей. Эти примеси изменяют физические характеристики теплоносителя, такие, как электропроводность, теплопроводность, вязкость, плотность. В работе утверждается, что проблему можно преодолеть с помощью анализа характеристик электромагнитного насоса [2], который всегда присутствует в подобных системах очистки теплоносителя и контроля его свойств. Исследованы магнитогидродинамические процессы, возникающие в коаксиальном канале индукционного электромагнитного насоса для жидкого металла. Основное внимание уделено анализу такой характеристики, которую можно оперативно измерить имеющимися в системе контроля устройствами. Для этой цели лучше всего подходит зависимость напора, развиваемого электромагнитным насосом, от частоты тока, который питает обмотки его индуктора. Эта зависимость должна быть получена при неизменных прочих характеристиках. В работе с помощью математического моделирования определены эти зависимости для имеющегося электромагнитного насоса при разных значениях расхода жидкого металла в некотором диапазоне значения электропроводности. Эти же зависимости определены в эксперименте с тем же самым электромагнитным насосом на галлиевой эвтектике, у которой известно точное значение электропроводности [3]. Оказалось, что все эти зависимости имеют экстремум. Обнаружено, что расчетное значение частоты электрического тока, обеспечивающее экстремум напора, совпадает с экспериментальным, если в расчетах взята электропроводность галлиевой эвтектики. Таким образом, с помощью математического моделирования и физических измерений можно определять неизвестное текущее значение электропроводности. Наиболее рационально применять данную методику в системе очистки жидкого металла от примесей. Методика является полностью бесконтактной и использует те же аппараты, которые включаются в комплексы очистки, что не требует введение в нее дополнительных устройств. В настоящее время, эта методика реализуется в системе очистки жидкого натрия, который используется для проведения экспериментальных работ в ИМСС УрО РАН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Козлов Ф.А., Иваненко В.Н. Натрий - теплоноситель АЭС с быстрыми реакторами // Атомная энергия. – 1996. – Т 80, № 5. – С.337-345.
- [2] Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics. – 2015. V. 51, No. 1. – P. 95-103.
- [3] Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V. et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy // Fluid Phase Equilibria. – 2018. – V. 465. – P. 1-9.

ПРОЦЕССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С РАСПЛАВЛЕННЫМ МЕТАЛЛОМ В ИНДУКТОРЕ «ТОПАЗ»

Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kiv@icmm.ru

Генерация течения в расплавленном металле дает положительный эффект в ряде металлургических процессов. Чаще всего необходимость в создании перемешивающего течения в цилиндрических ячейках возникает при литье слитков из цветного металла [1-3]. Течение гомогенизирует температуру металла и примеси, которые вводятся в него для улучшения качества. В результате образуется более однородная структура с улучшенными механическими свойствами [2], по сравнению с литьем без перемешивания. Для цилиндрической формы слитка удобнее всего использовать вращающееся переменное магнитное поле [1]. Добавление бегущего магнитного поля создает полоидальное течение [2]. Это существенно улучшает перемешивание. Однако это позволяет реализовать только два типа течения с ограниченными возможностями управления их топологией. Еще одним способом преодоления проблемы является нестационарность электропитания индуктора, что достигается модуляцией, сменой направления движения поля, либо чередованием включения и отключения питания [3]. Таким образом, интерес представляет поиск и исследование других способов усложнения топологии переменного магнитного поля и, как следствие, течения, для получения еще более эффективного перемешивания и более рациональной конструкции индуктора. В нашей работе мы закладываем метод поиска такого способа перемешивания с применением индуктора нового типа «ТОПАЗ». Он представляет собой набор обмоток, размещенных в пространстве на ферромагнитном сердечнике сложной формы. Ключевой особенностью индуктора является то, что каждой обмоткой можно управлять независимо от остальных. С помощью такого индуктора реализовать сложную пространственно-временную конфигурацию переменного магнитного поля в ячейке. Еще одним преимуществом данной конструкции является то, что она компактнее традиционных аппаратов подобного типа и состоит из секций. Это позволяет встроить индуктор «ТОПАЗ» в существующие производственные процессы и аппараты без необходимости их модернизации и даже остановки. В работе представлены результаты численного и экспериментального исследования процессов в жидком металле с этим индуктором. Показано, что даже простые режимы существенно усложняют вид как азимутального, так и полоидального течения по области ячейки. Возникающее течение сопровождается колебательным движением вихревых структур по области и взаимодействием между ними. Это приводит к эффективному перемешиванию жидкого металла и выравниванию поля температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Пермского края 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Davidson P.A. and Hunt J.C.R. Swirling recirculating flow in a liquid metal column generated by a rotating magnetic field // *Journal of Fluid Mechanics*, 1987. V. 185. P. 67
- [2] S. Denisov, V. Dolgikh, S. Khripchenko, I. Kolesnichenko, L. Nikulin The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // *Magnetohydrodynamics*, 2014. V. 4. P. 249-265.
- [3] Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger D., Dong J., Eckert K. and Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. // *Application to solidification of Al-Si alloys Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2008. V. 39. P. 304-316.

ЭВОЛЮЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА, СОЗДАННЫХ В ТРАНЗИТНОМ ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИНДУКТОРОМ

Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Мамыкин А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

kiv@icmm.ru

Существует большое количество методик измерения скорости для жидких металлов, применяемых в металлургической и атомной промышленности. Каждая из них имеет преимущества и недостатки [1]. Большое распространение получили кондукционные датчики и расходомеры [2]. Их преимуществом является простота реализации и широкие возможности измерения локальных характеристик пульсаций скорости, а главным недостатком является необходимость калибровки. В случае интенсивных течений среды с высокой электропроводностью эффект сноса наложенного магнитного поля приводит к появлению нелинейной зависимости возникающей разности потенциалов от скорости и расхода, что требует усложнения процедуры калибровки и интерпретации результатов измерений [3]. Нами разрабатывается другой способ измерения скорости потока жидкого металла в цилиндрическом канале, который не требует калибровки. Он основывается на корреляционной методике, аналогично применяемой в [4], но в нашем изотермическом случае пульсации скорости фиксируются с помощью регистрации электромагнитного отклика локальных измерителей скорости. Вопрос заключается в том как эффективно создать эти пульсации скорости.

В работе исследуется метод генерации пульсаций скорости, который заключается в использовании электромагнитных сил, созданных в локальной области канала с помощью индукторов вращающегося магнитного поля. Регистрация таких пульсаций осуществляется также с помощью электромагнитной системы, которая реализует метод электромагнитных корреляций. Главным преимуществом методики является возможность управлять интенсивностью и даже формой пульсаций скорости. В рамках комплексной работы изучается ряд задач, которые представлены в других докладах. В данном докладе описываются результаты исследования эволюции поля скорости, имеющей пульсации на фоне транзитного потока. Показано как влияет интенсивность пульсаций на возможность их регистрации с помощью корреляционной методики. Показаны результаты применения корреляционной методики для разных положений измерительных датчиков. Полученные характеристики необходимы для выбора параметров электромагнитного расходомера «ПИРАТ», который разработан на основе результатов данного комплексного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

- [1] Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A. A combined liquid sodium flow measurement system // *Magnetohydrodynamics*, 2016. V. 52. P. 53-60.
- [2] Shercliff J. A. *Theory of electromagnetic flow measurement*. Cambridge University Press, 1962. P. 146.
- [3] Adamovskii L., Golovanov V., Inkin Y., Kozubov E. Calibration of nonlinear magnetic flowmeters in the sodium circuits of fast power reactors // *Atomnaya Energiya*. 1987. V. 62. No. 2. P. 120–122.
- [4] Belyaev I., Razuvanov N., Sviridov V., Zagorsky V. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. V. 55. P. 37–43.

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ В ДВОЙНОМ ВОЗДУШНО-ПОРИСТОМ СЛОЕ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЕМ

Колчанова Е.А.¹, Колчанов Н.В.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
kolchanovaea@gmail.com, kolchanovn@gmail.com

В работе численно решается нелинейная задача о возникновении и развитии внутренней конвекции вплоть до пятой надкритичности в слое воздуха, частично заполненном гранулированной пористой средой с отношением размера гранул к ее толщине равным 1/10. Внешние границы слоя непроницаемые и идеально теплопроводные. На них поддерживаются одинаковые температуры. Конвективное движение возбуждается за счет внутреннего источника тепловыделения с постоянной мощностью, пропорциональной объемной доле твердой фазы в пористом подслое.

Как показано, например, в работах [1, 2] конвекция в двухслойной системе, содержащей тепловыделяющую пористую среду, может возникать либо в виде локальных валов малой длины волны, либо в виде крупномасштабных длинноволновых валов. Первые из них формируются, главным образом, в воздушном подслое, а вторые охватывают весь воздушный подслой и часть пористого подслоя, где воздух неустойчиво стратифицирован. На Рис. 1 показаны максимальная функция тока и число Нуссельта в зависимости от надкритичности, определенной как отношение внутреннего числа Рэлея-Дарси при развитой конвекции к его критическому значению. Видно, что конвекция усиливает теплопередачу через верхнюю границу системы с повышением надкритичности. Локальные валы характерны для доли твердой фазы $\phi = 0.4$ и 0.6 , а крупномасштабные валы – для $\phi = 0.25$. В последнем случае число Нуссельта меньше за счет проникновения течения в устойчиво стратифицированную нижнюю область среды.

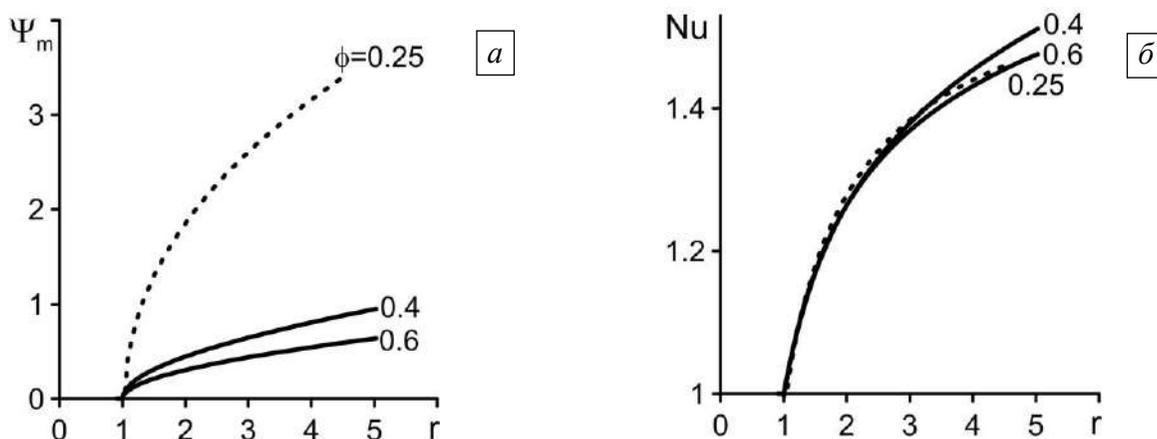


Рис. 1 Максимальная по модулю функция тока (а) и число Нуссельта (б) в зависимости от надкритичности при отношении толщин воздушного и пористого подслоев 0.12 и различных значениях объемной доли тепловыделяющей твердой фазы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045/>.

Литература

- [1] Carr M. Penetrative convection in a superposed porous-medium-fluid layer via internal heating // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 509. P. 305-329.
- [2] Kolchanova E., Kolchanov N. Onset of internal convection in superposed air-porous layer with heat source depending on solid volume fraction: influence of different modeling // Acta Mechanica. 2022. Vol. 233. P. 1769-1788.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ СУБЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Кондратьев Н.С., Подседерцев А.Н., Балдин М.Н., Безверхий Д.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kondratevns@gmail.com, stevenmoore@yandex.ru, matvej1999@gmail.com,
solikamsk20001@gmail.com

Физические многоуровневые модели неупругого деформирования, учитывающие эволюционирующую структуру, являются перспективными для разработки функциональных материалов [1]. В работе предложена расширенная (учетом взаиморасположения кристаллитов) статистическая многоуровневая модель для исследования термомеханической обработки поликристаллов, включающая описание процесса динамической рекристаллизации [2]. Известно, что рекристаллизация приводит к существенному перестроению зеренной, субзеренной и дефектной структуры материала. В частности, при определенных режимах термомеханической обработки поликристаллов возможно объединение соседних субзерен в кластеры в результате коалесценции. Рассматривается проблема влияния коалесценции субзерен вблизи исходных большеугловых границ на образование зародышей рекристаллизации при термомеханических воздействиях [3]. Кластеры субзерен вблизи большеугловых границ являются потенциальными зародышами рекристаллизации, реализующейся согласно механизму, основанному на миграции исходных участков большеугловой границы, обусловленной разницей запасенной энергии между соседними зернами. Коалесценция – один из механизмов динамического возврата, конкурирующий за запасенную энергию к рекристаллизации. В случае интенсивной коалесценции по обе стороны межзеренной границы рекристаллизация локально может быть затруднена или вовсе прекращена. Для решения сформулированной проблемы применяется аппарат многоуровневого моделирования с внутренними переменными, являющийся перспективным для разработки металлов с заданной структурой и необходимыми эксплуатационными свойствами. Представлены результаты моделирования поведения образца меди, исследуется влияние температуры, скорости деформации, состояния субзеренной структуры на формирование и развитие зародышей рекристаллизации вблизи произвольной и специальной межзеренной границы с учетом коалесценции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения, 2019. – 605 с.
- [2] Trusov P., Kondratev N., Podsedertsev A. Description of Dynamic Recrystallization by Means of An Advanced Statistical Multilevel Model: Grain Structure Evolution Analysis //Crystals. – 2022. – Vol. 12 (5). – 653.
- [3] Kondratev N., Trusov P., Podsedertsev A., Baldin M. Subgrain Coalescence Simulation by Means of an Advanced Statistical Model of Inelastic Deformation //Materials. – 2022. – Vol. 15 (15). – 5406.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Корелин А.А., Труфанова Н.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
korelin-art@yandex.ru, ktei@pstu.ru

Для грамотной настройки оборудования при вулканизации полиэтиленовой изоляции пероксидным методом, подбор технологических параметров на производстве осуществляется опытным путем. Для снижения затрат на дорогостоящие материалы, требуется разработка математической модели процесса пероксидной сшивки, которая позволит подбирать необходимые параметры расчетным путем. В данном исследовании приводится математическое описание процесса теплообмена при прохождении заготовки в трубе вулканизации, а также проводится проверка адекватности результатов расчета, полученных разработанной осесимметричной математической моделью процесса вулканизации полиэтиленовой изоляции. Оценка производится путем сравнения с результатом натурального эксперимента, проведенного на действующем оборудовании одного из кабельных предприятий, при изолировании заготовки в трубе вулканизации. В работе приведены температурные кривые, полученные при использовании разных моделей турбулентного течения среды в вулканизационной трубе.

Для более точного расчета, в работе использованы теплофизические свойства сшиваемого полимерного материала, полученные при выполнении серии опытов на лабораторном испытательном оборудовании [1].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что разработанная математическая модель адекватно описывает исследуемый процесс, а полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего определения оптимальных технологических параметров вулканизации в производственном процессе.

Литература

[1] Козицына М.В. Стратифицированное пространственное течение аномально-вязких жидкостей в каналах формующего инструмента при созкструзии: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. – Пермь, 2019. – 108 с.

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИКИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Коровайцева Е.А.

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
katrell@mail.ru

В работе рассматривается решение задач осесимметричного деформирования оболочек вращения из высокоэластичных материалов при больших деформациях в двух постановках. Общепринятая постановка предполагает использование соотношений безмоментной теории оболочек [1]. В качестве альтернативы рассматривается использование уравнений моментной теории оболочек [2]. Ограничений на величину перемещений и деформаций оболочки не накладывается. Система разрешающих уравнений включает в себя дифференциальные уравнения равновесия и геометрические соотношения, алгебраические статические и нелинейные геометрические соотношения, нелинейные физические соотношения. Для формулировки обобщенного алгоритма решения задачи система уравнений деформирования оболочки записывается в векторно-матричной форме. Система дополняется граничными условиями и условиями сопряжения сегментов оболочки, в общем случае являющейся составной. Для решения сформулированной нелинейной краевой задачи используется метод дифференцирования по параметру [3]. Тогда исходная краевая задача сводится к совокупности квазилинейной краевой и нелинейной начальной задач в скоростях искомых переменных по параметру дифференцирования. Решение полученной совокупности систем уравнений осуществляется последовательно итерационным способом.

В качестве тестовых рассмотрены задачи о раздувании полусферы и цилиндра из неогукковского материала с различными условиями закрепления края. Расчеты проводятся до достижения величин истинных деформаций не менее 500%. Численные эксперименты показали существенную зависимость результатов решения задачи от ряда параметров вычислительного алгоритма (выбор параметра продолжения решения, величина начального и максимального шагов по параметру продолжения, величина предварительного давления, способ определения предварительного напряженного состояния). При этом расчеты по моментной теории сопровождаются большими сложностями, чем расчеты по безмоментной теории. Показана необходимость разработки критериев подбора оптимальных параметров вычислительного алгоритма в применении к решению задач анализа напряженно-деформированного состояния оболочек из высокоэластичных материалов, сопровождающегося большими перемещениями и деформациями.

Литература

- [1] Коровайцева Е.А. Смешанные уравнения теории мягких оболочек // Труды МАИ. – 2019. – №108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109235>
- [2] Шаповалов Л. А. Уравнения эластики тонкой оболочки при неосесимметричной деформации // Изв. АН СССР. Мех. тв. тела, 1976. № 3. С. 62–72.
- [3] Григолюк Э.И., Шалашилин В.И. Проблемы нелинейного деформирования: метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики деформируемого твердого тела – М.: Наука, 1988. – 232 с.

ВЫБОР СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ЭФФЕКТ КОНТРАКЦИИ

Костарев К.Г., Торохова С.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kostarev@icmm.ru, torokhova.s@icmm.ru

Одним из перспективных направлений моделирования массопереноса в условиях микрогравитации является использование неоднородных по составу систем жидкостей с равной исходной плотностью. Действительно, выглядит логичным, что, если все жидкости неоднородной по составу системы обладают равной плотностью, то их смешивание либо диффузия одной из компонент, равной по плотности контактирующим смесям, не должны приводить к возникновению перепада плотности и, следовательно, к развитию конвективного движения. Однако реализации такого сценария на практике препятствуют два эффекта. Первый из них – это эффект двойной диффузии, связанный с различным значением коэффициентов диффузии для растворов разных веществ. Опережающее проникновение молекул с большей скоростью диффузии может привести к развитию неустойчивости зоны смешивания даже в ранее устойчиво стратифицированной по плотности системе двух растворов.

Вторым эффектом является контракция, представляющая собой неаддитивное изменение объема (и, соответственно, плотности) смеси жидкостей при вариации концентрации ее компонент. Причиной контракции служит образование соединений на основе молекул/ионов растворенного вещества и молекул растворителя благодаря электростатическому взаимодействию и возникновению водородных или иных связей. Увеличение, равно как и снижение концентрации одной из компонент смеси, приводит к локальному изменению плотности и развитию конвективного движения в системе жидкостей в лабораторных условиях. К сожалению, эффект контракции, присущий всем истинным растворам, до сих пор практически не учитывается при анализе гидродинамических и массообменных явлений. Причиной этого является отсутствие информации о контракции для большинства жидких систем. Для устранения этого недостатка в предлагаемом исследовании определена контракция неводных растворов одно- и многоатомных спиртов и карбоновых кислот. Полученные данные систематизированы и проанализированы, предложен ряд систем жидкостей, перспективных для лабораторного моделирования диффузионных процессов в микрогравитации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-41-590009.

МНОГОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

Котельникова Н.В., Князев Н.А.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kotelnickova@gmail.com, nikita.kniaziev@mail.ru

Ввиду возрастающих требований к качеству металлических изделий и новейших материалов появляется необходимость разработки математических моделей, обладающих высокой степенью универсальности, способных описывать несколько стадий процессов деформирования и разрушения металлов [1].

Рассматривается многоуровневая математическая модель, основанная на физических теориях пластичности, в которой особое внимание уделяется процессу зарождения и распространения межзеренных трещин. В модели выделено несколько структурно-масштабных уровней: макроуровень (для постановки и решения краевой задачи упруговязкопластичности), мезоуровень-I (для описания поведения отдельных зерен представительного объема поликристалла в терминах механических переменных), мезоуровень-II (для физического описания эволюции дислокационной структуры внутри зерен), а также мезоуровень-III, на котором моделируются физические механизмы, действующие вблизи межзеренных или субзеренных границ и повышающие их дефектность за счёт скопления зернограницных дислокаций, вакансий и дислокаций ориентационного несоответствия. Предполагается, что граница, содержащая скопления дефектов, становится предрасположенной к возникновению межзеренной трещины.

Для количественной оценки дефектности межзеренной границы предложен подход, основанный на вычислении фрактальной размерности (ФР) границы. Принимается гипотеза о том, что скопления дефектов повышают неоднородность структуры, значительным образом зависящую от масштаба рассмотрения [2]. В процессе деформирования в границе накапливаются дефекты (например, дислокации ориентационного несоответствия), в результате чего ФР границы будет понижаться относительно «идеального» бездефектного случая. Достижение ФР границы критически низкого значения интерпретируется как зарождение межзеренной микротрещины. Представлены результаты исследования зависимости ФР от количества и от морфологии залегания дислокаций в границе. Получено эмпирическое соотношение для вычисления ФР в поперечном сечении межзеренной границы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.
- [2] Использование методов фрактального анализа при изучении коррозионной стойкости сплава титана ВТ1-0 / В.М. Киселев, О.А. Голованова, В.Б. Федосеев, Т.С. Грязнова // Вестник Омского университета. – 2016. – № 2(80). – С. 44-49.

ВЗАИМОСВЯЗЬ УРОВНЯ КИСЛОРОДНОЙ САТУРАЦИИ И ПЕРФУЗИИ ТКАНИ КРОВЬЮ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЗВЕНЬЕВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

Красников Г.В.¹, Мизева И.А.²

¹Тулский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

gvkrasnikov@gmail.com, mizeva@icmm.ru

Снабжение тканей организма кислородом и удаление углекислого газа является важнейшей функцией кардиореспираторной системы. Ключевую роль в решении этой задачи играет система кровообращения, в особенности ее конечное звено – микроциркуляторное русло, где непосредственно реализуется газообмен между тканью и кровью. Физиологически важная взаимосвязь между насыщением кислородом и кровотоком остается недостаточно изученной. Традиционные методы исследования микрокровотока (лазерная доплеровская флоуметрия) не позволяют дифференцировать различные сосудистые отделы микроциркуляторного русла. Однако, поскольку скорость течения крови в артериолах, венах и капиллярах различается, то при построении исследовательской методики с разрешением по скорости кровотока косвенным образом можно разделить различные отделы микрососудистой сети. Именно такой подход реализован в методе Enhanced Perfusion and Oxygen saturation (EPOS, Perimed AB, Stockholm, Sweden). Так компоненты перфузии со скоростью <1 мм/с (V_1) могут быть ассоциированы с кровотоком в капиллярах, со скоростью $1-10$ мм/с (V_2) с кровотоком в венах и мелких артериолах, со скоростью >10 мм/с (V_3) отражать кровоток в более крупных артериолах.

Нами были исследованы данные измерений дифференцированной по скорости кровотока перфузии и уровня сатурации кислородом ткани кожи в нативном состоянии и при локальном нагреве. Исследования проведены на основе открытой базы данных измерений в группе из 30 здоровых добровольцев [1]. При помощи вейвлет-анализа изучен спектральный состав представленных сигналов и их взаимная почастотная корреляция.

В нативном состоянии характерна более высокая корреляция кислородной сатурации и колебаний кровотока для компонентов V_1 и V_2 в диапазонах эндотелиальных, нейрогенных и миогенных колебаний. Для респираторных и пульсовых колебаний, напротив, корреляция выше для компонента V_3 . При локальном нагреве взаимосвязь колебаний кислородной сатурации и колебаний кровотока значимо снижается в диапазонах эндотелиальных, нейрогенных и миогенных колебаний для компонентов V_1 и V_2 . Для компонента V_3 достоверное снижение корреляции отмечено только для эндотелиальных и нейрогенных колебаний. Для респираторных и пульсовых колебаний в условиях нагрева значимых изменений корреляции не выявлено.

Полученные результаты подтверждают функциональную значимость низкоскоростных компонентов перфузии, ассоциированных с кровотоком на уровне капилляров и мелких артериол в обеспечении процессов кислородного обмена на уровне тканей.

Литература

[1] Jia S. et al. A dataset of speed-resolved blood perfusion and oxygen saturation in human skin response to thermal stimulation // bioRxiv. – 2020.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ЭПИТЕЛИАЛЬНОЙ ТКАНИ В РАЗЛИЧНЫХ ПО ГЕОМЕТРИИ ПОРАХ СКАФФОЛДА

Красняков И.В., Брацун Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
krasnyakov_ivan@mail.ru

Основной проблемой тканевой инженерии является то, что любая живая ткань является многоклеточным образованием. Таким образом, исследователь, который ставит перед собой задачу вырастить искусственную ткань из одной клетки, стоит перед серьёзным вопросом: каким образом организовать кооперацию между тысячами новых клеток так, чтобы они образовывали бы правильно структурированные ансамбли, которые можно было бы включить уже в организм без неприятных последствий.

Главный инструмент, с помощью которого тканевая инженерия пытается собирать паззлы из отдельных клеток, является скаффолд. Под ним понимается пористая матрица произвольной структуры, которая засеивается стволовыми клетками будущей ткани. Важно отметить, что твёрдое тело, с которым входит в контакт клетка, не является естественной средой обитания клеток. Клетки эволюционировали либо в жидком многокомпонентном растворе, либо в составе многоклеточного организма. Таким образом, процессы вблизи поверхности ткань-твёрдое тело требуют отдельного исследования. Все детали взаимодействия клеток и твёрдой поверхности до сих пор неизвестны. В случае пористого скаффолда экспериментальные наблюдения показывают, что клетки предпочитают ложиться на стенки микроканалов плоским образом. Возможно, они воспринимают стенки пор как базальную мембрану, которая играет важную роль в структурировании эпителиальных тканей в организме. Деление клеток приводит к заполнению пор, при этом клетки растут как вдоль канала, так и к его центру создавая многослойную структуру. Эксперименты показывают, что клетки могут изменить стратегию и прикрепляться поперек канала в порах скаффолда.

В представленной работе мы демонстрируем возможности разработанной нами ранее математической модели роста карциномы [1, 2] для решения задач, связанных с ростом тканей в порах скаффолда. Так как эпителиальные ткани выстилают поверхности органов, слизистые оболочки, а её клетки прикрепляются к базальной мембране, то модель можно представить в двумерном виде, с определёнными оговорками. Помимо этого, разработанная математическая модель учитывает индивидуальную динамику клеток, многоуровневое строение, хемомеханическое взаимодействие и основные свойства, которыми обладают реальные ткани, а именно: клетки могут динамически менять свою форму в ходе эволюции ткани; переходить из одного состояния в другое, которое сопровождается сменой фенотипа; клетки имеют способность осуществлять митотическое деление и интеркаляцию. Последние два из перечисленных являются важными, так как они способствуют уменьшению энергии системы. Разрабатываемая модель способствует развитию методов математического моделирования в статических и динамических культурах клеточной ткани, растущих в скаффолдах.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Мегагрантов, договор № 075-15-2021-578 от 31 мая 2021 г.

Литература

- [1] Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Biomechanical modeling of invasive breast carcinoma under a dynamic change in cell phenotype: collective migration of large groups of cells // *Biomech. Model. Mechanobiol.* – 2020. – Vol. 19. – P. 723-743.
- [2] Красняков И.В., Брацун Д.А., Писмен Л.М. Математическое моделирование роста эпителиальной ткани // *Российский журнал биомеханики.* – 2020. – т. 24, № 4. – С. 439-454.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПОРИСТЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ НАНОБАЛОК ЭЙЛЕРА-БЕРНУЛЛИ, ТИМОШЕНКО, ШЕРЕМЕТЬЕВА-ПЕЛЕХА

Кречин А.Н.¹, Яковлева Т.В.¹

¹ *Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*
san9.antonov@yandex.ru, yan-tan1987@mail.ru

Построены математические модели пористых функционально-градиентных нелинейных нано балок. При построении математических моделей использованы кинематические гипотезы Эйлера-Бернулли, С.П. Тимошенко, Шереметьева-Пелеха. Геометрическая нелинейность учитывается по модели Т. фон Кармана. Учет нано механики основан на использовании модифицированной моментной теории упругости [1]. Рассмотрено три типа пористости, заданные показательной функцией [2,3]. Функционально-градиентный материал состоит из керамики и металла. Нелинейные системы дифференциальных уравнений в частных производных сводятся к задаче Коши методом конечных разностей 2-го порядка, которая решается методом Рунге-Кутты от 4-го до 8-го порядка и методом Ньюмарка. Исследована сходимость методов в зависимости от разбиений по пространственной и временной координатам. Достоверность результатов обосновывается сходимостью полученных решений, которые указаны выше и сопоставлением с известными решениями, как для полноразмерных структур, так и нано.

Проведен анализ влияния типа пористости, коэффициентов пористости и градиентности материала, значения размерного коэффициента на нелинейную динамику нано балок. Исследованы сценарии перехода от гармонических колебаний к хаотическим, показана что при некоторых параметрах колебания могут переходить из гармонических в хаотические и далее в гиперхаотические. Выявлены особенности характера колебания нано балок в зависимости от типа кинематических моделей Эйлера-Бернулли, Тимошенко и Шереметьева-Пелеха.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-71-10083.

Литература

- [1] Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C., Tong, P.: Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *Int. J. Solids Struct.* 39(10), 2731–2743 (2002)
- [2] Fan, Fan, et al. "Modified couple stress-based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally graded microplates using NURBS-based isogeometric approach." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 372 (2020): 113400
- [3] Krysko, A.V., Papkova, I.V., Rezhnikov, A.F., Krysko, V.A. A New Mathematical Model of Functionally Graded Porous Euler–Bernoulli Nanoscaled Beams Taking into Account Some Types of Nonlinearities // *Materials*, 2022, 15(20), 7186

МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМАЧИВАНИЯ ПРИ РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Кривилев М.Д.

Удмуртский государственный университет, Ижевск
mk@udsu.ru

Эффекты смачивания играют ключевую роль в технологиях металлургического соединения металлических деталей. Это объясняется наличием большого числа факторов, осложняющих движение контактной точки – границы мениска по поверхности паяемых изделий. К их числу относятся наличие оксидной пленки, термокапиллярные эффекты, наличие фазовых переходов в зоне смачивания. В результате анализ таких явлений требует многофакторных исследований и моделей [1], обеспечивающих смачивание.

В обзорном докладе рассмотрены основные физико-химические процессы, протекающие при пайке металлических сплавов [2]. Отмечены основные механизмы, определяющие кинетику движения контактной точки линии смачивания, обсуждены способы управления указанными механизмами. В качестве комплексной задачи, содержащей все особенности исследуемых явлений, приведен обзор результатов совместного космического эксперимента РЕАЛ, реализованного на борту Международной космической станции в 2019-2022 гг.

Проведено экспериментальное и теоретическое изучение [3] процессов пайки твердым

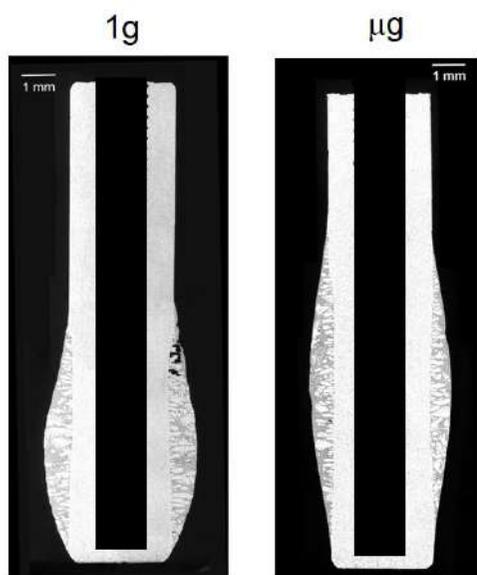


Рисунок 1 – Структура образцов после испытаний при различном уровне гравитации

припоем образцов заданной геометрии в условия земной и микрогравитации. Установлены важные отличие в форме мениска и окончательной микроструктуре образцов. Впервые установлено, что условия микрогравитации существенно изменяют распределение и морфологию зерен фазы α -Al. Происходит переход к однородному распределению поровых дефектов при одновременном наличии различных макрозон в структуре образца.

Полученные данные обсуждаются с точки зрения кинетики движения контактной точки и реологии течения расплава в условиях постепенного плавления материала припоя [4]. С этой целью построено несколько математических моделей, которые использованы для объяснения механики и физики явлений смачивания в проведенных экспериментах.

Литература

- [1] Dehsara M., Fu H., Mesarovic S.Dj., Sekulic D.P., Krivilyov M. (In)Compressibility and parameter identification in phase field models for capillary flows // Theoretical and Applied Mechanics. – 2017. – V.44 (2). – P.189-214.
- [2] Шутов И.В., Камаева Л.В., Баталова Е.А., Королев М.Н., Кривилев М.Д., Анализ смачивания и диффузионных процессов при контактном сплавлении припоев Zn–Cu–Al и Mg–Al со сплавом AlMg3 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 8. – С. 80-86.
- [3] Wu Y., Lazaridis K., Krivilyov M.D., Mesarovic S.Dj., Sekulic D.P. Effects of gravity on the capillary flow of a molten metal // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2023. – V.656. – P. 130400.
- [4] Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S. Dj. Non-isothermal Wetting of an Al Alloy Pin by Al-Si Melt Under Terrestrial and Microgravity Conditions // Microgravity Science and Technology. – 2022. – V. 34. – Paper No. 65.

КОНТАКТНАЯ ДИНАМИКА ПОРИСТЫХ БАЛОК ЭЙЛЕРА-БЕРНУЛЛИ

Кружилин В.С.¹, Яковлева Т.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени

Гагарина Ю.А.», Саратов

mrkruzhilin@mail.ru, yan-tan1987@mail.ru

Работа посвящена построению математической модели контактного взаимодействия функционально-градиентных пористых нанобалок Эйлера-Бернулли. Верхняя нанобалка находится под действием внешней знакопеременной поперечной равномерно распределенной нагрузки. Контактное взаимодействие учитывается согласно теории Б.Я. Кантора [1]. Обе балки до соприкосновения являются геометрически линейными, а в результате контакта наступают хаотические нелинейные колебания [2]. Наноэффекты учитываются по модифицированной моментной теории упругости [3]. Нано параметр, возникающий в моменте более высокого порядка, является дополнительным независимым параметром длины материала, связанным с симметричным тензором градиента вращения. Пористость материала принята по теории, описанной в работе [4]. При построении функционально-градиентной теории в качестве материалов рассмотрены керамика и металл. Исходные дифференциальные уравнения, граничные и начальные условия получены из вариационного принципа Гамильтона. Численное решение реализовано методом Бубнова-Галеркина в высших приближениях и методами типа Рунге-Кутты. Изучено влияние коэффициента нано-размерности и величины зазора между балками на контактное взаимодействие двух нанобалок и на характер их нелинейных колебаний.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-71-10083, <https://rscf.ru/project/22-71-10083/#!>

Литература

- [1] Kantor B. Ya., Contact Problems of the Nonlinear Theory of Shells of Revolution (Nauk. Dumka, Kiev, 1990) [in Russian].
- [2] Yakovleva, T.V., Awrejcewicz, J., Krysko, A.V., Krechin, A.N., Krysko, V.A. Quantifying chaotic dynamics of nanobeams with clearance. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2022, 144, 104094.
- [3] Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity.// International Journal of Solids and Structures. 2002, 39(10), pp. 2731 - 2743.
- [4] Fan F., Xu Y., Sahmani S., Safaei B. Modified couple stress based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally microplates using NURBS-based isogeometric approach. // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2020. . – pp. 372, 113400.

ПРОДОЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ С СУПЕРПАРАМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Крыласова О. С.¹, Поперечный И. С.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

krlsva.olga@yandex.ru, poperechny@icmm.ru

Намагниченность наноразмерных антиферромагнетиков (АФМ), в отличие от массивных образцов, не равна нулю. Впервые на это указал Неель [1], который связал магнитную декомпенсацию с дефектами кристаллической решётки, неравным количеством спинов в магнитных подрешётках и поверхностными эффектами. Тщательные измерения, выполненные в последние два десятка лет, позволили обнаружить нескомпенсированный (спонтанный) магнитный момент у наночастиц ферригидрита, оксида меди и оксида никеля [2], подтвердив тем самым гипотезу Нееля. Другим важным свойством наноразмерных антиферромагнетиков является суперпарамагнетизм, обусловленный ориентационными тепловыми флуктуациями векторов намагниченностей подрешёток. Благодаря этим особенностям АФМ наночастицы являются подходящим кандидатом для разнообразных биомедицинских приложений [3].

Одним из наиболее надёжных способов извлечения информации о свойствах наночастиц является измерение их динамической магнитной восприимчивости. Анализ получаемых при этом результатов возможен только в рамках кинетической теории. Её приближённый вариант, пригодный для изучения процессов перемагничивания вдали от СВЧ-диапазона, был разработан в работе [4]. Авторы указанной статьи предложили кинетическое уравнение для функции распределения направлений АФМ-вектора и показали, что его решение позволяет описать магнитный отклик наноразмерных антиферромагнетиков для произвольных значений температуры и спонтанной намагниченности.

В настоящей работе подход [4] применён для изучения релаксационного спектра и динамической магнитной восприимчивости одноосных АФМ наночастиц, помещённых в сонаправленное с осью анизотропии поле смещения. Показано, что в области низких частот (меньше-порядка 100 кГц) вклад в магнитный отклик таких частиц даёт единственная релаксационная мода, отвечающая термофлуктуационным переходам АФМ вектора через энергетический барьер. Найдена зависимость соответствующего времени релаксации от величины нескомпенсированного магнитного момента, подмагничивающего поля, а также от температуры. Рассчитаны частотные зависимости действительной и мнимой частей динамической восприимчивости системы при различных значениях поля смещения. Показано, что последнее позволяет управлять средней энергией, поглощаемой АФМ наночастицей за период изменения зондирующего поля.

Литература

- [1] Néel L. Superparamagnétisme des graines très fines antiferromagnétiques // C. R. Acad. Sci. (Paris). – 1961. – V.252. – P. 4075–4080.
- [2] Balaev D.A., Krasikov A.A., Popkov S.I., Dubrovskiy A.A., Semenov S.V., Velikanov D.A., Bayukov O.A., Kirillov V.L., Mart'yanov O.N. Features of the quasi-static and dynamic magnetization switching in NiO nanoparticles: Manifestation of the interaction between magnetic subsystems in antiferromagnetic nanoparticles // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – V.515. – P.167307.
- [3] Kannan K., Radhika D., Nikolova N.P., Sadasivuni K.K., Mahdizadeh H., Verma U. Structural studies of bio-mediated NiO nanoparticles for photocatalytic and antibacterial activities // Inorganic Chemistry Communications. – 2020. – V. 113. – P. 107755
- [4] Poperechny I. S. and Raikher Yu. L. Low-Frequency Dynamic Magnetic Susceptibility of Antiferromagnetic Nanoparticles with Superparamagnetic Properties // Magnetism. – 2022. – Vol. 2. – P. 340-355.

ОБ ОДНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ЛИСТА ГРАФЕНА

Крылова Е.Ю.¹, Саркисян С.О.²

¹*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

²*Ширакский государственный университет, Гюмри, Армения
kat.krlova@bk.ru, s_sargsyan@yahoo.com*

Научно технический прогресс и развитие современных технологий неумолимо приводят к тому, что устройства и электроника на углеродных нанопластинах и нанотрубках начинают напрямую конкурировать и даже превосходить устройства, в которых используются традиционные материалы. Выдающиеся свойства графена делают его идеальным кандидатом на роль нового материала для создания электронных и фотонных систем следующего поколения, а также гибкой и биосовместимой электроники. Последнее обуславливает необходимость создания максимально точных математических моделей, описывающих поведение вышеуказанных двумерных наноматериалов. В работе на основании моментно-мембранной теории пластин и оболочек [1] (в которой для графена вычислены все упругие постоянные по этой теории), построена математическая модель графеновой пластины в поле одного неподвижного электрода. К затвору и пластине подключен источник электродвижущей силы с заданной постоянной во времени разностью потенциалов. Объемные пондеромоторные силы электрического поля рассматриваются как сила Кулона, нормальная к срединной плоскости пластины.

Проведено исследование влияние граничных условий, величины зазора между пластиной и затвором, разности потенциалов на статический поперечный изгиб графенового листа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 22-21-00331.

Литература

[1] Саркисян С. О. Стержневая и континуально-моментная модели деформаций двумерных наноматериалов, Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25. – № 2. – С. 109-121. – DOI 10.55652/1683-805X_2022_25_2_109

НЕЛИНЕЙНЫЕ СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СЕТЧАТОЙ ПЛАСТИНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Крылова Е.Ю., Синичкина А.О.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
Kat.krlova@bk.ru, andreevaanastasiaolegovna@gmail.com*

Объектом исследования является гибкая пластина сетчатой структуры в поле одного неподвижного электрода, расположенного от нее на некотором расстоянии. К затвору и пластине подключен источник электродвижущей силы с заданной разностью потенциалов. Объемные пондеромоторные силы электрического поля, действующие на пластину в таком случае, рассматриваются как поверхностная сила, приложенная по нормали к срединной плоскости, – сила Кулона. Подобные конструкционные элементы являются составными частями различных МЭМС и НЭМС, поэтому возникает необходимость построения и изучения математических моделей, описывающих их поведение в зависимости от различных внешних факторов и собственной их геометрии. Уравнения движения элемента геометрически нелинейной пластины, граничные и начальные условия получены из вариационного принципа Остроградского-Гамильтона на основании гипотез Кирхгофа. Рассматривается изотропный, однородный материал. Масштабные эффекты учтены посредством микрополярной теории со стесненным вращением частиц. То есть наряду с обычным полем напряжений рассматриваются также и моментные напряжения. При этом предполагается, что поля перемещений и вращений не являются независимыми [1]. Геометрическая нелинейность учтена по теории Т. фон Кармана. Предположим, что пластина состоит из нескольких семейств густо расположенных ребер. Каждое семейство ребер характеризуется шириной ребра, расстоянием между ребрами и углом наклона ребер относительно положительного направления оси абсцисс. В таком случае согласно континуальной теории Г.И. Пшеничного [2] можно заменить регулярную систему ребер сплошным слоем. Из условий равновесия прямоугольного элемента можно записать соотношения, связывающие напряжения, возникающие в эквивалентной гладкой пластине, с напряжениями в ребрах. Для определения физических соотношений сетчатой пластины использовался метод множителей Лагранжа.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих нелинейные колебания рассматриваемой сетчатой пластины использован метод Бубнова-Галеркина в высших приближениях.

В работе проведено исследование влияния геометрии сетчатой структуры пластины, а также значения разности потенциалов источника электродвижущей силы на частоту собственных колебаний пластины.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 22-21-00331.

Литература

- [1] Yang F., Chong A. C. M., Lam D. C. C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity // Int. J. Solids Struct. – 2002. – Vol. 39. – P. 2731–2743.
- [2] Пшеничных Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок – М.: Наука, 1982. – 352 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИЙ МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИПА «MULTICORE PARTICLE»

Кузнецов А.А.¹, Новак Е.В.², Пьянзина Е.С.², Канторович С.С.¹

¹*University of Vienna, Wien, Austria*

²*Уральский федеральный университет, Екатеринбург
ekateina.novak@urfu.ru*

Магнитные нанокompозитные частицы типа «multicore particle» (МНМЧ) представляют собой плотные кластеры однодоменных магнитных нанокристаллов, встроенных в жесткую немагнитную матрицу. В то время как зерна (гранулы) внутри МНМЧ обычно имеют характерный линейный размер порядка 10 нм, размер МНМЧ может варьироваться от десятков до нескольких сотен нанометров. В последнее время МНМЧ привлекли большое внимание исследователей из-за их широкого спектра потенциальных биомедицинских и биотехнологических приложений [1]. Суспензии МНМЧ также интересны своими уникальными реологическими свойствами, контролируемые полем [2]. С помощью компьютерного моделирования методом молекулярной динамики нами было проведено теоретическое исследование равновесных свойств суспензии МНМЧ в немагнитной жидкости. Каждую МНМЧ мы моделируем в виде сферически непроницаемой частицы, случайно заполненной сферическими магнитными зернами (гранулами). Каждая гранула имеет магнитный момент постоянной величины, который может свободно вращаться под действием приложенных магнитных полей и тепловых флуктуаций. Все зерна взаимодействуют друг с другом через потенциал диполь-дипольного взаимодействия. Система исследуется при постоянной комнатной температуре и в отсутствие внешнего однородного магнитного поля. Для проведения компьютерных экспериментов используется пакет моделирования ESPResSo [3].

Для изучения процессов самоорганизации МНМЧ нами был проведен кластерный анализ систем с различными константами диполь-дипольного взаимодействия $\lambda = \mu^2/\sigma^3 k_B T$, представляющими собой отношение характерной энергии дипольного взаимодействия двух зерен к тепловой энергии (μ – магнитный момент гранулы, σ – диаметр гранулы). Кластерный анализ проводился на двух уровнях: изучалась как самоорганизация МНМЧ, так и самоорганизация зерен внутри образовавшихся кластеров из МНМЧ. Нами были рассчитаны такие характеристики, как распределение кластеров из МНМЧ по размерам, число мостов, образованных гранулами из разных МНМЧ в кластерах из МНМЧ различных размеров, длина мостов, число частиц в мостах и магнитный момент мостов. Было показано, что для образования устойчивых кластеров из МНМЧ необходимо, чтобы гранулы в соседних МНМЧ образовали мосты. Анализ же мостов показал, что есть бимодальное распределение их топологии: небольшие кластеры из гранул, подобные линейным цепочкам и длинные кластеры, напоминающие разомкнутое кольцо, с очень небольшим магнитным моментом.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 19-72-10033. Расчеты выполнены на кластере Уральского федерального университета.

Литература

- [1] Dutz S. Are magnetic multicore nanoparticles promising candidates for biomedical applications? // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52, № 9. – P. 1-3.
- [2] Zablotsky D., Kralj S., Kitenbergs G., Maiorov M.M. Relating magnetization, structure and rheology in ferrofluids with multi-core magnetic nanoparticles // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 278. – P.104248.
- [3]. <https://espressomd.org/>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО СРЕДНЕГО ПОЛЯ 2-ГО ПОРЯДКА: ДИНАМИЧЕСКАЯ НАЧАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ

Кузнецова О.Б., Соловьева А.Ю., Иванов А.О.

¹Уральский математический центр, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
Alexey.Ivanov@urfu.ru

Доклад посвящен теоретическому расчету вклада трех-частичных корреляций в частотные спектры динамической начальной магнитной восприимчивости феррожидкостей. Математическая модель базируется на уравнении Фоккера-Планка-Брауна (ФПБ) для ориентационной плотности вероятности магнитного момента случайно выбранной феррочастицы при учете только броуновского механизма релаксации. На феррочастицу действует слабое зондирующее переменное гармоническое магнитное поле частоты ω и коллективное магнитное поле, создаваемое всеми остальными феррочастицами. В уравнении ФПБ последнее поле представлено в форме, предложенной в работе [1]. Вычисление этого поля проводится в рамках модифицированной модели среднего поля 2-го порядка [2,3] с учетом трех-частичных вкладов при разложении парной корреляционной функции в ряд по степеням объемной концентрации ϕ феррочастиц. Учет трех-частичных корреляций привел к неожиданному результату: коллективное магнитное поле, создаваемое всеми магнитными диполями в феррожидкости, имеет не только дипольную составляющую, но и квадрупольное слагаемое, которое не проявляется в слабом внешнем магнитном поле.

Для динамической начальной магнитной восприимчивости получено выражение, имеющее кубическую точность по концентрации феррочастиц:

$$\chi(\omega) = \chi_D(\omega) \left[1 + \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\lambda^2}{25} + \frac{\chi_L}{48} \right) \chi_D(\omega) \right]$$

Здесь $\chi_D(\omega)$ есть динамическая восприимчивость Дебая, $\chi_L = 8\lambda\phi$ есть статическая восприимчивость Ланжевена, и λ традиционно носит название «параметр магнитодипольного взаимодействия» и описывает характерное значение энергии диполь-дипольного взаимодействия двух однородно намагниченных шаров при их контакте относительно тепловой энергии.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект «Уральский математический центр», соглашение № 075-02-2022-877.

Литература

- [1] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S. Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles // *Soft Matter*. – 2016. –V. 12. – Iss. 15. - P. 3507-3513.
- [2] Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: an influence of interparticle correlations // *Physical Review E*. - 2001. -V. 64. – No. 4. - P. 041405-01-12.
- [3] Иванов А.О., Кузнецова О.Б. Магнитогранулометрический анализ ферроколлоидов: модифицированная модель среднего поля второго порядка // *Коллоидный журнал*. – 2006. - Т. 68. - № 4. - С. 472-483.

ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА РАЗМЕРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ЧАСТИЦ

Кузнецова Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

julyas@icmm.ru

Аэрозоли, представляющие собой механическую смесь частиц дисперсной фазы со средой носителем, являются широко распространенным объектом в природе и повседневной деятельности человека. Одной из главных характеристик таких систем является распределение частиц по размерам (спектр частиц). Спектр частиц определяет макроскопическое поведение ансамбля частиц дисперсной фазы и, в конечном счете, от него зависят газодинамическое движение, оптические и диффузионные свойства аэрозоля. В свою очередь, сам спектр размеров частиц подвержен сильным изменениям в процессе течения. Для атмосферных аэрозолей наиболее существенным является изменение дисперсного состава в результате процессов обмена частиц со средой носителем (конденсация и испарение) и слияния частиц в результате парных столкновений (коагуляция). В случае пылевых аэрозолей, состоящих из твердых водорастворимых частиц, описание эволюции спектра частиц значительно усложняется, поскольку на динамику этих процессов дополнительно оказывает влияние степень растворенности вещества, содержащегося в частице. Для решения данной задачи требуется создание модели эволюции размера, как индивидуальных водорастворимых частиц, так и их кластеров (сложной формы), образующихся в результате процессов коагуляции.

В работе [1] автором предложена и верифицирована математическая модель, позволяющая описать кинетику взаимодействия водорастворимой однородной и химически нейтральной сферической аэрозольной частицы с влажным воздухом на всех этапах ее гигроскопического роста/уменьшения размера. На основе предложенной модели проведено моделирование гигроскопического изменения размера комплексной частицы - полученной в результате коагуляции двух частиц с нерастворенными ядрами. Поскольку при слипании частиц, образуется новая несферическая частица, то применение модели [1] напрямую невозможно, поэтому эволюция размера комплексной частицы описывалась с помощью двух различных приближений. В первом случае комплексная частица заменялась парой исходных частиц, которые участвовали в процессе коагуляции. Во втором случае комплексная частица заменялась одной частицей с эффективным радиусом, которые находились из условия сохранения массы и объема комплексной частицы.

Для описания изменения спектра частиц за счет процессов гигроскопического роста и коагуляции полидисперсного аэрозоля использовалась модель среднего поля. На основе численных расчетов установлено, что при влажности окружающего воздуха близкой к гигроскопической точке растворение и рост частиц имеют доминирующее значение при малых концентрация аэрозоля. При повышении концентрации влияние гигроскопического изменения размера влияет на форму только на начальной стадии эволюции спектра частиц и практически не отражается на конечной форме кривой распределения.

Литература

[1] Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, Вып. 1. – С. 31–44. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.1.3

ИНЕРЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПО ВРЕМЕНИ ТЕЧЕНИЯ КОЛМОГОРОВА С ТОЧНЫМ УЧЕТОМ СИЛЫ КОРИОЛИСА

Курганский М.В.¹

¹*Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва*
kurgansk@ifaran.ru

Исследована инерционная параметрическая неустойчивость периодического по времени и по пространству течения (осциллирующее течение Колмогорова) вращающейся стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска, с полным учетом силы Кориолиса в задаче и возможности того, что поток имеет произвольную ориентацию в горизонтальной плоскости. В целом, периодические по времени течения составляют важный специальный класс движений жидкости, и их устойчивость уже долгое время является объектом изучения, как в геофизической, так и классической гидродинамике [1, 2]. Классическая баротропная неустойчивость (связанная с наличием точки перегиба в профиле скорости) периодического по времени течения Колмогорова исследовалась в [3, 4]. Длинноволновая баротропная неустойчивость зависящего от времени течения Колмогорова на бета-плоскости была исследована в недавней работе [5]. Нами показано существование неустойчивости для сдвигов скоростей, меньших тех, на которые указывает критерий инерционной устойчивости стационарного течения Колмогорова с тем же пространственным периодом и амплитудой скорости. В частности, получены оценки неустойчивости для слабо стратифицированных геофизических сред, например, для глубоких слоев океана и для хорошо перемешанных по вертикали конвективных слоев атмосферы. Последнее, например, имеет место в пограничном слое над незамерзающими полярными морями при адвекции очень холодных воздушных масс или, напротив, в экваториальной атмосфере при развитой проникающей конвекции. Также предполагается, что возможные приложения теории могут быть непосредственно связаны с лабораторным экспериментом. Рассмотрены два различных теоретических сценария включения полного учета силы Кориолиса в задачу: во-первых, в исходной прямоугольной системе координат, когда в качестве основного потока необходимо рассматривать не только синусоидальный профиль скорости, но и связанный с ним синусоидальный профиль плавучести; во-вторых, в косоугольных декартовых координатах с наклоненной параллельно вектору угловой скорости общего вращения вертикальной осью, когда в качестве основного потока достаточно рассматривать синусоидальный профиль скорости. Показано, что в обоих случаях полный учет силы Кориолиса приводит к уменьшению степени инерционной неустойчивости основного потока. Данное исследование поддержано Российским научным фондом (грант № 22-27-00039). Полученные результаты опубликованы в статье [6].

Литература

- [1] Davis S.H. The stability of time-periodic flows. – Annu. Rev. Fluid Mech., 1976, vol. 8, pp. 57–74.
- [2] Samelson R. M. Time-periodic flows in geophysical and classical fluid dynamics. – Handbook of Numerical Analysis (Amsterdam: Elsevier), 2009, vol. 14, pp. 231–246.
- [3] Frenkel A. L. Stability of an oscillating Kolmogorov flow. – Phys. Fluids, 1991, vol. A3, pp. 1718–1729.
- [4] Zhang X., Frenkel A. L. Large-scale instability of generalized oscillating Kolmogorov flows. – SIAM J. Appl. Math., 1998, vol. 58, pp. 540–564.
- [5] Radko T. Barotropic instability of a time-dependent parallel flow. – J. Fluid Mech., 2021, vol. 922, p. A11.
- [6] Kurgansky M.V. Inertial instability of the time-periodic Kolmogorov flow in a rotating fluid with the full account of the Coriolis force. – Fluid Dynamics Research, 2022, vol. 54, p. 055504 (27pp).

ПРЯМАЯ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Курмоярцева К.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kurmoiartseva.k@mail.ru

Один из методов прогнозирования времени безопасной эксплуатации деталей и конструкций является применение физически-ориентированного многоуровневого моделирования, позволяющего учитывать накопления дефектов в процессе деформирования. В процессе изготовления металлические материалы испытывают значительные неупругие деформации, которые ведут к эволюции внутренней структуры и возможному появлению областей с высокими локальными напряжениями. Важным остается вопрос прогнозирования поведения деталей при их эксплуатации с учетом дефектов, появившихся на стадии изготовления. Перспективным инструментом исследования поведения поликристаллических материалов является математическое моделирование с использованием физических теорий пластичности, позволяющее отслеживать влияние отдельных механизмов накопления повреждений и деформирования на особенности поведения материалов.

Целью данного исследования является построение прямой дислокационно-ориентированной математической модели, обеспечивающей возможность описания процессов деформирования и разрушения на мезо- и микроуровнях, в том числе – зарождение и развитие трещин в результате эволюции внутренней дефектной структуры материала.

С применением прямой дислокационно-ориентированной математической модели исследовалось поведение поликристаллического макрообразца, состоящего из совокупности зерен, каждое из зерен состоит из субзерен (кристаллитов). Структура модели включает подмодели макроуровня, мезоуровня-I и мезоуровня-II. В подмоделях макроуровня и мезо-I описание упругопластического деформирования осуществляется в терминах континуальных механических характеристик – скоростей сдвигов и касательных напряжений в системах скольжения. В рамках мезоуровня-II описание ведется на языке плотностей дислокаций и скоростей их движения за счет следующих механизмов: зарождение новых в результате работы источников Франка – Рида, аннигиляция разноименных дислокаций соответствующих систем скольжения, межкристаллитные потоки дислокаций между кристаллитами, которые в общем случае могут привести к образованию на их границах дислокаций ориентационного несоответствия.

Структура разрабатываемой модели позволяет включить в рассмотрения механизмы зарождения трещин как результат эволюции дислокационных структур. Например, при локальном скоплении дислокаций одного знака, превышающем критическое значение, образуется микротрещина по механизму Стро [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

[1] Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. R. Soc. Lon. Ser. –1954. – A 223. – Pp. 404–414.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ КАРТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Кучинский М.О.^{1,2}, Козлов М.В.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь
katbchinskiy@gmail.com

Исследование активности кавитационных событий в сонохимических реакторах представляет собой важную задачу в различных технических приложениях. Применение теста фольгой (foil test) является одним из стандартных способов визуализации распределения интенсивности кавитационных событий в сонохимическом реакторе [1].

С использованием модифицированного метода, основанного на исследовании эрозии поверхности алюминиевой фольги, представляется возможным визуально регистрировать процесс разрушения фольги по областям с наибольшим количеством повреждений и определять распределение кавитационной активности в сонохимическом реакторе [2].

Тепловые карты являются наглядным способом представления данных для временной динамики всевозможных процессов, поэтому их использование эффективно для развития метода foil test в качестве временного трехмерного визуализатора активности кавитационных событий при лабораторных исследованиях УЗ полей. Цель работы состоит в обработке методом тепловых карт данных, полученных с помощью модифицированного метода теста фольгой, для случая трехмерного картирования объема сонохимического реактора.

Для проведения эксперимента была изготовлена лабораторная установка, включающая кювету из акрилового стекла, фольгу, натянутую на пластиковую рамку и источник УЗ; в качестве рабочей жидкости использовалась очищенная водопроводная вода. Для регистрации областей разрушения фольги применялись цифровая камера и контрольный источник освещения. В результате для каждого вертикального среза реактора получался набор фотографий, который затем обрабатывался с использованием алгоритма на Python. Проведение экспериментов для расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга вертикальных срезов, охватывающих весь реактор, позволило построить 3D-карту разрушений. В дальнейшем производилось построение итогового трехмерного изображения (3D-картирование) активности кавитационных событий.

Таким образом, разработан метод регистрации кавитационной активности и исследования временной динамики кавитационной активности в центральной области сонохимического реактора на основе разрушения фольги и использования тепловых карт.

Литература

- [1] Tangsopa W., Thongsri J. Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis //Ultrasonics. – 2019. – Т. 91. – С. 68-76.
- [2] Yuan B., Jiang Y., Zhu L. Study on the processing methods of aluminum foil measurement signals for ultrasonic cleaning parameters //2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation. – IEEE, 2011. – С. 1180-1183.

ОБОБЩЕННАЯ ТОЧКА КОССЕРА. НОВЫЕ КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Лалин В.В., Нго Х.Х.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
vllalin@yandex.ru

В механике сплошных сред хорошо известна модель тела-точки (body-point) – это геометрическая точка, обладающая массой (плотностью) и тензором инерции. Такая модель используется в теориях стержней, оболочек и пластин, а также в теории сред с независимыми вращательными степенями свободы [1]. Модель, под названием «точка Коссера» (Cosserat point), в виде деформируемого элемента конечных размеров, обладающего массой и тензором инерции, была использована для численного решения различных задач механики сплошных сред [2,3].

В настоящей работе предлагается новая модель – обобщенная точка Коссера. В этой модели геометрическая точка также обладает массой и тензором инерции, однако, масса точки при движении по разным направлениям может быть различной. Другими словами, обобщенная точка Коссера имеет симметричный положительно определенный тензор масс, не являющийся шаровым тензором, в то время как обычная точка Коссера имеет шаровой тензор масс, характеризуемый одним параметром – массой точки.

На основе предложенного подхода строятся новые конечные элементы для задач динамики стержневых систем. Эти конечные элементы позволяют отделить деформационные степени свободы от степеней свободы, связанных с жесткими перемещениями элемента. В результате удастся сформулировать новые алгоритмы решения задач динамики, которые позволяют: повысить точность определения внутренних усилий; получить двухсторонние оценки собственных частот; решать задачи динамики для систем, не закрепленных от жестких перемещений, без использования искусственных методов регуляризации.

Литература

- [1] Mechanics of Generalized Continua, Advances in Mechanics and Mathematics. – Springer, New York, 2010. – 337 p.
- [2] Rubin M.B. On the theory of Cosserat point and its application to the numerical solution of continuum problems // J. Appl. Mech. – 1985. – V. 52. – P. 368-372.
- [3] Rubin M.B. Cosserat Theories: Shells, Rods and Points, Solid Mechanics and its Applications. – Kluwer, The Netherlands, 2000. – 480 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПАРЕНИЕМ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ

Ласковец Е.В.

*Алтайский государственный университет, Барнаул
Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск
katerezanova@mail.ru*

Рассматривается трехслойное конвективное течение в горизонтальном канале с твердыми непроницаемыми верхней и нижней стенками и недеформируемыми границами раздела. Для изучения влияния физических и геометрических характеристик на течения в системах типа «жидкость – жидкость – газ» построено точное решение, являющееся обобщением известного решения Остроумова – Бириха [1-3]. Учитываются эффекты тепло- и тепломассопереноса на границах жидкость-жидкость и жидкость-газ, соответственно. При моделировании процессов в двухкомпонентном верхнем слое системы принимаются во внимание и эффекты термодиффузии и диффузионной теплопроводности. Математическая модель основана на приближении Буссинеска уравнений Навье-Стокса, а также уравнении диффузии для описания переноса пара в газопаровом слое. Рассмотрены два варианта граничных условий для концентрации пара на верхней стенке канала: условие полной абсорбции пара и условие отсутствия потока пара. Также на твердых верхней и нижней стенках выполнены условия прилипания для скорости, задано линейное распределение температуры. На термокапиллярных границах раздела сред полагаются равными функции скорости и температуры, заданы кинематическое и динамическое условия и условие переноса тепла. На границе жидкость-газ дополнительно полагается выполненными условие баланса масс с учетом эффекта Соре. Условие теплового баланса записывается с учетом эффекта Дюфура. Концентрация насыщенного пара вычисляется исходя из следствия уравнений Менделеева-Клапейрона и Клапейрона-Клаузиуса [3]. Расход газа полагается заданным в верхнем слое системы.

В качестве примера рассматривается система типа «силиконовое масло–вода–воздух». Изучено влияние расход газа, толщины слоев и тепловой нагрузки на границах системы. Представлены случаи смены режима течения с чисто Пуазейлевского на условно Пуазейлевское второго типа, а также процесса конденсации пара на испарение легкой жидкости. Показано, что значение высоты нижнего слоя системы оказывает большее влияние на характер течения, чем среднего. При малых значениях толщины слоя тяжелой жидкости возникают застойные явления в обоих жидких слоях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-11-00243, <https://rscf.ru/project/22-11-00243/>).

Литература

- [1] Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи – Москва-Ленинград, 1952. – 256 с.
- [2] Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // ПМТФ. – 1966. - № 3. – С. 69-72.
- [3] Laskovets E.V. Mathematical modeling of three-layer flows in the “Liquid-liquid-gas” system with evaporation based on exact solutions // ИРНТ. – 2022. – V. 10, No 3. – P. 45-60.

ПАРАДОКСЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА

Лебедев А.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lav@icmm.ru*

Синтез в начале 60-ых годов прошлого века коллоидных растворов ферромагнитных материалов ознаменовал рождение нового научного направления на границе классической гидродинамики и магнетизма – физики магнитных жидкостей [1]. Первоначально коллоидные частицы магнетиков получались путем механического измельчения в шаровых мельницах. Технология была весьма трудоемкой и не позволяла производить магнитные жидкости в промышленных масштабах. Ситуация в корне изменилась после разработки технологии химического осаждения [2, 3]. С ее применением получение магнитных жидкостей стало возможным в больших объемах. К сожалению, путем осаждения хорошо синтезируется только жидкость на основе магнетита Fe_3O_4 . Попытки получить мелкодисперсные порошки ферритов других металлов, как правило, терпели неудачу.

Проблема получения коллоидных частиц ферритов двухвалентных металлов была разрешена совсем недавно в Институте технической химии УрО РАН [4]. В отличие от [2, 3], в [4] осаждение ионов щелочью производится из смеси двухвалентных солей металла и железа. В полученный осадок затем вводится окислитель и выполняется так называемая операция ферритирования с дополнительным добавлением щелочи. Таким способом удалось синтезировать практически все известные ферриты двухвалентных металлов.

Самым интересным с точки зрения феррогидродинамики представителем ряда ферритов является феррит кобальта. По сравнению с магнетитом, его частицы наряду с высокой намагниченностью обладают и большой энергией магнитной анизотропии. Поэтому магнитные моменты жестко связаны с телом частиц и релаксация намагниченности происходит путем вращения частиц. Другими словами, в кобальт-ферритовой жидкости реализуется броуновский механизм релаксации намагниченности в чистом виде.

В предлагаемой работе описываются результаты измерения динамической восприимчивости коллоидных растворов феррита кобальта, стабилизированных в воде двойным слоем поверхностно-активного вещества. Была измерена частотная зависимость динамической восприимчивости при разных значениях вязкости жидкости, ее концентрации и температуры.

Полученные результаты противоречат теории броуновской релаксации намагниченности. В частности, характерное время релаксации нарастает гораздо быстрее по сравнению с приращением вязкости жидкости. При этом с ростом вязкости увеличивается и ширина максимума на мнимой части восприимчивости. Изменение температуры при постоянной вязкости также существенно смещает максимум поглощения энергии, чего не должно быть в принципе. По-видимому, неелевская релаксация намагниченности все-таки вносит немалый вклад в релаксационные процессы. С другой стороны, если образец жидкости заморозить (выключить броуновский механизм), его восприимчивость резко падает (в 26 раз меньше начальной).

Литература

- [1]. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи Физических Наук. 1974. Т. 112. Вып. 3. С.435 - 458.
- [2]. Elmore W.C. On preparation of the magnetite high dispersed // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 309-310.
- [3]. Бибик Е.Е., Лавров И.С. Способ получения феррожидкости. А. с. СССР № 457666.
- [4]. Лысенко С.Н., Якушева Д.Э., Астафьева С.А. Способ получения частиц ферритов. Патент РФ № 2725231.

САЕ КАК ВНЕДРЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИКИ ПРОЧНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ. НА ПРИМЕРЕ ПАКЕТА ФИДЕСИС И ТЕОРИИ МНОГОКРАТНОГО НАЛОЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Левин В.А., Вершинин А.В.

*МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
ИФЗ РАН, Москва*

В условиях Индустрии 4.0 автоматизируются интеллектуальные операции при проектировании новых изделий, сооружений, технологических процессов (включая аддитивное производство), новых материалов (особенно метаматериалов, “умных” материалов, композитов). Кроме того, изменился инструментарий, используемый специалистами в области механики деформируемого твердого тела (МДТТ), и их роль как в области фундаментальных исследований, так и прикладных разработок. МДТТ исторически была основой для проведения проверочных прочностных расчетов при проектировании новых изделий и принятия решения о ресурсе изделия на основе данных мониторинга в процессе эксплуатации. С развитием и внедрением систем инженерного анализа (САЕ - Computer-aided engineering) или их комбинаций появилась возможность полностью автоматизировать процесс решения дифференциальных уравнений, описывающих постановку задачи, включая связанные. При использовании САЕ-систем расчетчик, конструктор, исследователь задает конструкцию (ее CAD- модель) и внешние усилия (в терминах МДТТ - граничные условия), описание материалов (в терминах МДТТ - определяющие соотношения) и далее автоматически проводится расчет напряженно-деформированного состояния. Если также выбрана теории прочности, то определяются и «потенциальные зоны разрушения» при закритическом сценарии нагружения. Таким образом, одна из основных функций расчетчика-исследователя автоматизирована. Поэтому в области фундаментальных исследований, на взгляд авторов, существенными являются разработки, позволяющие дополнить функционал и вычислительные возможности САЕ, например:

- Построение определяющих соотношений (моделей материалов) для новых материалов (композиты, метаматериалы, “умные” материалы) и моделей с использованием дополнительных соотношений;
- Экспериментальные работы (в том числе и для валидации заложенных в САЕ математических моделей);
- Построение (формулировка) механических и математических постановок для новых типов задач (с учетом преднагружения, междисциплинарные задачи);
- Нахождение точных и приближенных численно-аналитических решений (для верификации САЕ);
- Разработка новых направлений использования МДТТ:
 - о механических моделей и постановок задач (при необходимости) для систем машинного обучения на основе нейронных сетей при разработке систем искусственного интеллекта для профильных отраслей промышленности в части формирования синтетических данных для обучения и предсказательной аналитики;
 - о механических моделей и постановок задач для систем промышленного Интернета вещей для профильных отраслей промышленности, чтобы проводить предсказательное моделирование Цифрового двойника изделия с учетом информации, получаемой при измерении (и изменении) параметров изделия в режиме реального времени.
- Разработки в области вычислительных методов с учетом специфики задач МДТТ для решения прикладных задач механики сплошной среды (МСС), адаптированных под современные высокопроизводительные и облачные платформы;
- Работы совместно с разработчиками САЕ для демократизации численного моделирования в задачах МСС для широкого круга пользователей-неспециалистов в данной области.

В докладе на примере реализации теории многократного наложения больших деформаций и сопутствующих результатов нелинейной механики в промышленном пакете Фидесис показано, что такая реализация позволяет расчетчикам и исследователям самостоятельно решать необходимые задачи без глубокого понимания и детальной проработки математической и механической постановок задач в части записи уравнений равновесия (движения), определяющих соотношений, граничных и начальных условий. Отмечается, что часть результатов (включая аддитивные технологии), приведенных в докладе, получена самостоятельно независимыми исследователями с использованием пакета Фидесис. По мнению авторов, реализация в САЕ фундаментальных результатов МДТТ является новым и востребованным направлением деятельности ученых - механиков, позволяющим реформировать, сохранить и развить научные коллективы.

В заключении приводится структура пакета Фидесис, его функционал и примеры решения промышленных задач, как для машиностроения, так и для горной и нефтегазовой отраслей.

ВЕРИФИКАЦИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ И ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА С ДЕФЕКТАМИ

Ледон Д.Р., Баяндин Ю.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
ledon@icmm.ru

Широкодиапазонные определяющие соотношения, построенные с использованием статистической теории дефектов [1, 2], положены в основу построения математической модели для описания деформационного поведения и разрушения упруго-вязко-пластических материалов: металлы и сплавы. Предложены процедуры идентификации неизвестных параметров построенной модели с использованием экспериментальных данных. Проведена верификация с использованием модифицированного теста Тейлора [3]. Построенная модель реализована в конечно-элементных пакетах прикладных программ для решения краевых задач механики деформируемого твердого тела. Предложенная модель успешно применена для описания поведения металлов и сплавов при усталостном [4-8], динамическом [9, 10] и квазистатическом [11] нагружении. Описаны эффекты усталостного разрушения, в том числе – при гигацикловой усталости, дуальности кривой Вёлера, локализации пластической деформации.

Исследование выполнено в рамках госзадания № АААА-А19-119013090021-5.

Литература

- [1] Наймарк О.Б. Структурно-скейлинговые переходы в твердых телах с дефектами и некоторые симметричные аспекты теории поля // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 113-126.
- [2] Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical dynamics of damage-failure transition in wide range of load intensity // Acta Mechanica. – 2021. – Vol. 232. – № 5. – P. 1943-1959.
- [3] Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Уваров С.В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора–Гопкинсона // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 449-458.
- [4] Bannikov M., Oborin V., Bayandin Yu., Ledon D., Kiselkov D., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S., Naimark O. Damage-failure transition under consecutive dynamic and very high cycle fatigue loads // J. Appl. Phys. – 2022. – Vol. 131. – P. 135902.
- [5] Ledon D.R., Bannikov M.V., Oborin V.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Prediction of the fatigue life of VT1-0 titanium in various structural states under very high cycle fatigue // Letters on Materials. – 2021. – Vol. 11, No. 4. – P. 422-426.
- [6] Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical Dynamics of Defects and Mechanisms of Damage-Failure Transitions in Fatigue // Materials. – 2021 – Vol. 14, No. 10. – P. 2554.
- [7] Naydenkin E.V., Mishin I.P., Ratochka I.V., Oborin V.A., Bannikov M.V., Bilalov D.A., Naydenkin K.E. Fatigue and fracture behavior of ultrafine-grained near β titanium alloy produced by radial shear rolling and subsequent aging // Materials Science & Engineering A. – 2021. – Vol. 810. – P. 140968.
- [8] Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323-334.
- [9] Соковикова М.А., Чуудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 301-312.
- [10] Соковикова М.А., Симонов М.Ю., Билалов Д.А., Симонов Ю.Н., Наймарк О.Б. Локализация пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 45-57.
- [11] Соковикова М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чуудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение разрушения локализованным сдвигом сплава АМг6 при статическом и динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 300-311.

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ, ПОДКЛЮЧЁННЫХ К ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, senin.a@icmm.ru*

Пассивный механизм демпфирования резонансных и свободных колебаний основан на прикреплении к поверхности конструкции пьезоэлемента и подключении к нему внешней электрической цепи, обладающей импедансом. Подбор оптимальных параметров такой цепи является достаточно ресурсоёмкой задачей. В статье [1] отмечалось, что наиболее эффективным инструментом для построения оптимизационных алгоритмов в силу значительно меньших вычислительных затрат является модальный анализ. Он позволяет получить в явном виде спектр собственных частот и соответствующих им декрементов колебаний вне зависимости от вида возбуждающего воздействия. В данной работе выполнено сравнение двух математических постановок, позволяющих описывать динамическое поведение пьезоэлемента. Первая из них, классическая, основана на трёхмерных уравнениях линейной теории пьезоупругости [2, 3], а вторая, альтернативная, представляет собой их упрощение с целью применения совместно с теорией тонких пластин и оболочек. В данном подходе используются представление пьезоэлемента в рамках гипотезы плоского напряжённого состояния и допущение о равенстве нулю всех компонент векторов напряжённости электрического поля и электрической индукции, за исключением нормальных к электродированной поверхности [4].

Выполнена верификация разработанных конечно-элементных алгоритмов, основанных на двух упомянутых выше формулировках, и проведено сравнение их вычислительной эффективности. На модельных примерах проанализировано изменение комплексных собственных значений электромеханической системы в зависимости от сопротивления R и индуктивности L последовательной электрической RL -цепи, подключённой к пьезоэлементу. Полученные результаты продемонстрировали совпадение частот колебаний (действительные части) в пределах относительной погрешности менее 1%, в то же время показатели демпфирования (мнимые части) различаются более значительно. Альтернативная постановка позволяет получить классическую модальную задачу, решение которой требует меньше вычислительных ресурсов и сокращает время расчётов в двести и более раз. Построены амплитудно-частотные характеристики, демонстрирующие снижение амплитуды колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10054).

Литература

- [1] Yurlova N.A., Sevodina N.V., Oshmarin D.A., Iurlov M.A. Algorithm for solving problems related to the natural vibrations of electro-viscoelastic structures with shunt circuits using ANSYS data // International Journal of Smart and Nano Materials. – 2019. – V. 10, No. 2. – P. 156–176.
- [2] Allik H., Hughes J.R. Finite element method for piezoelectric vibration // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1970. – V. 2. – P. 151–157.
- [3] IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Std176-1987. – New York: IEEE, 1988. – 66 p.
- [4] Thomas O., Deü J.-F., Ducarne J. Vibrations of an elastic structure with shunted piezoelectric patches: efficient finite element formulation and electromechanical coupling coefficients // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – V. 80. – P. 235–268.

О ВЫБОРЕ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЫ

Лесникова Ю.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ulesig@gmail.com

В работе выполнено моделирование промежуточного испытания для определения области применимости изготовленного оптического волокна – технологической пробы. Оно заключается в контроле оптических характеристик световода, намотанного с постоянным усилием на алюминиевую катушку, при термоциклировании в диапазоне температур $[-60^{\circ}\text{C}; +60^{\circ}\text{C}]$. В рамках исследования было рассмотрено влияние различных геометрических параметров конструкции на деформационные и оптические характеристики волокна: радиуса катушки, смещения положения светопроводящей жилы, геометрической конфигурации защитно-упрочняющего покрытия [1]. Построенная математическая модель позволяет учесть изгиб, натяг, контакт, зависимость коэффициента температурного расширения от температуры и вязкоупругие свойства материалов защитно-упрочняющих покрытий (ЗУП).

В данном исследовании рассмотрен вопрос о влиянии характера сопряжения между волокном типа Panda (часть из кварцевого стекла) и слоем внутреннего ЗУП, а также между слоями ЗУП на поведение системы. Исследование проводилось при стандартном соотношении толщин слоев защитных покрытий ($d_v = 80$ мкм, $d_{\text{ЗУП}_1} = 130$ мкм, $d_{\text{ЗУП}_2} = 167$ мкм), при радиусе катушки 5 мм. Граничные условия по S_{K_1}

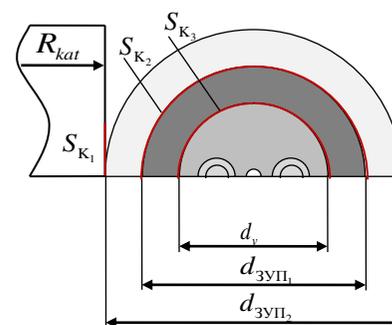


Рисунок – Поперечное сечение технологической пробы

соответствуют проскальзыванию без трения. Для анализа влияния характера сопряжения по контактными поверхностями S_{K_2} и S_{K_3} были рассмотрены: идеальный контакт (полное сопряжение материалов, реализованное путем создания конечно-элементной сетки узел в узел, т.е. создание одинакового поля перемещений и напряжений на границе сред); полная адгезия (моделирование условий полного прилипания поверхностей контакта при любом характере воздействия на систему, т.е. создание только поля одинаковых перемещений на границе сред); фрикционный контакт (моделирование контакта с учетом трения и всеми типами контактных состояний с заранее неизвестным характером распределения площадей сопряжения с разным контактным статусом). Влияние характера сопряжения оценивалось по максимальному контактному давлению на поверхности S_{K_1} и модовому двулучепреломлению в светопроводящей жиле. Установлено незначительное влияние характера сопряжения зон контакта ЗУП-волокно на деформационные и оптические характеристики. В рассмотренной модели расхождения контактных поверхностей не наблюдается. Для рационализации времени выполнения вычислительных процедур принято решение рассматривать идеальный контакт волокна в ЗУП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

[1] Lesnikova Y.I., Trufanov A.N., Kamenskikh A.A. Analysis of the polymer two-layer protective coating impact on Panda-type optical fiber under bending // Polymers. – 2022. – Vol.14. – Art. 3840.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА

Лисовенко Д.С.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
lisovenk@ipmnet.ru

Систематизированы многочисленные кубические кристаллы, имеющие как положительные, так и отрицательные значения коэффициента Пуассона в зависимости от ориентации растягиваемых образцов (такие кристаллы именуют частичными ауксетиками) [1]. Указано также несколько полных кубических ауксетиков, у которых коэффициент Пуассона всегда является отрицательным. Дана классификация частичных кубических ауксетиков с использованием двух безразмерных упругих параметров. Найдено критическое значение одного из параметров, при котором происходит качественное изменение ориентационного поведения кристаллов.

Проанализирована зависимость упругих свойств одноатомных (простых веществ) и двухатомных (соединений типа АВ) кристаллов кубической сингонии от типов их кристаллической структуры и межатомной связи [2]. Показано, что упругие свойства этих кристаллов следуют одному из двух трендов – ковалентному или ионному. Продемонстрировано, что ауксетика (материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона) выявляются среди одноатомных кристаллов со структурой А1 (ГЦК), относящимся к щелочноземельным, переходным и постпереходным металлам, актиноидам и лантаноидам, и одноатомных кристаллов со структурой А2 (ОЦК), относящимся к щелочным металлам. Среди бинарных двухатомных соединений наибольшее число ауксетиков выявляется среди алмазоподобных кристаллов со структурой цинковой обманки В3, имеющих стехиометрию $A^N B^{8-N}$.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-01200).

Литература

- [1] Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Classification of cubic auxetics // *Physica Status Solidi B*. – 2013. – V.250, N 10. – P.2038–2043.
- [2] Епишин А.И., Лисовенко Д.С. Влияние кристаллической структуры и типа межатомной связи на упругие свойства одноатомных и двухатомных кубических кристаллов // *Изв. РАН. МТТ*. – 2022. – № 6. – С. 79-96.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННОГО МЕТОДА КАНТОРОВИЧА-ГАЛЕРКИНА ДЛЯ АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Литвинов В.Л.^{1,2}, Литвинова К.В.^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Самарский государственный технический университет, Самара

vladlitvinov@rambler.ru, kristinalitvinova900@rambler.ru

В статье рассмотрены резонансные характеристики нелинейных колебаний каната с подвижными границами. Анализируются явления резонанса и прохождения через резонанс. Разработан приближенный метод учета влияния сил сопротивления и вязкоупругих свойств на систему. Этот метод также позволяет рассматривать более широкий класс граничных условий по сравнению с другими приближенными методами решения краевых задач с подвижными границами. В статье рассмотрены резонансные характеристики вязкоупругого каната с подвижными границами по методу Канторовича – Галеркина. Анализируется явление установившегося резонанса и явление прохождения через резонанс.

Одномерные системы с движущимися границами широко используются в технике [1–3]. Наличие подвижных границ вызывает значительные трудности при описании таких систем. Точные методы решения таких задач ограничены волновым уравнением и относительно простыми граничными условиями. Из приближенных методов наиболее эффективным является метод Канторовича-Галеркина, описанный в [3]. Однако этот метод можно использовать и в более сложных случаях. Этот метод позволяет учесть влияние сил сопротивления на систему, вязкоупругие свойства колеблющегося объекта, а также слабую нестационарность граничных условий. В работе рассмотрены явления установившегося резонанса и прохождения через резонанс при поперечных колебаниях каната переменной длины с учетом вязкоупругости и демпфирующих сил. Выполняя преобразования, аналогичные преобразованиям [3], получено выражение для амплитуды колебаний, соответствующей n -му динамическому режиму. Также получены выражения, описывающие явление установившегося резонанса и явление прохождения через резонанс.

Выражение, определяющее максимальную амплитуду колебаний при прохождении через резонанс, было численно исследовано на максимум. Анализируется зависимость амплитуды колебаний каната от граничной скорости, вязкоупругости и демпфирующих сил.

Результаты численных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- при уменьшении скорости движения границы, сил вязкоупругости и демпфирования амплитуда колебаний увеличивается;
- при стремлении к нулю граничной скорости, сил вязкоупругости и демпфирования амплитуда колебаний стремится к бесконечности.

В заключение отметим, что приведенные в статье результаты позволяют провести количественный анализ установившегося резонанса и явления прохождения резонанса для систем, колебания которых описываются поставленной задачей.

Литература

- [1] Весницкий А.И., Потапов А.И. Поперечные колебания канатов шахтных подъемников // Динамика систем. Горький: Горький. ун-т, 1975. Вып. 7. С. 84–89.
- [2] Горошко О.А., Савин Г.Н. Введение в механику деформируемых одномерных тел переменной длины. Киев: Наукова Думка, 1971. С.290.
- [3] Литвинов В.Л., Анисимов В.Н. Поперечные колебания каната, движущегося в продольном направлении // Вестник Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4. - С. 161-165.

ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЭРАЦИОННОГО РЕЖИМА В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Филимонов С.А.

¹*Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
sttupick@yandex.ru*

Процесс урбанизации в мире, запущенный в прошлом веке, закономерно привел к появлению исследований с применением как физического, так и численного моделирования процессов тепломассопереноса, протекающих в городской среде [1-6], основная конечная цель которых повышение комфортности проживания людей. В рамках данных исследований изучаются такие вопросы как: городской остров тепла [6]; формирование аэрационного режима при обтекании ветром городских кварталов и отдельных зданий [2, 4]; распространение загрязнений [3]; влияние городской застройки на уровень пешеходной комфортности [1]; процессы тепломассообмена в городской среде [3, 5].

В данной работе рассматривается влияние излучения (солнечного и теплового) на формирование аэрационного и теплового режима на примере городского района Красноярска, содержащего здания разной высоты. Исследуемый район, представляет собой крупный торговый центр, расположенный среди жилой застройки, который обтекается слабым ветровым потоком в зимнее время.

Моделирование проводилось на основе микромасштабной модели городской атмосферы, основанной на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье—Стокса для несжимаемых течений в неупругом приближении [7]. Для расчета солнечного и теплового переноса излучения использовался модифицированный метод конечного объема с граничными условиями, описанными в работах [1, 8].

Солнечное излучение в значительной степени определяет процессы тепломассопереноса в городской среде и соответственно, аэрационный режим. В дневное время это приводит к интенсификации конвективных течений в приземной области.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Литература

- [1] Robinson D. Computer modelling for sustainable urban design-physical principles, methods and applications – L.: Earthscan, 2011. – P. 278.
- [2] Tominaga Y., Shirzadi M. Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment // Building and Environment. Vol. 206. 2021. 108389.
- [3] Gao Z., Bressona R., Y.Qua Y., M. Maya, Munckb C., Carissimoa B. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse // Urban Climate. Vol. 23. 2018. P. 114-130
- [4] Поддаева О.И., Дубинский С.И., Федосова А.Н. Численное моделирование ветровой аэродинамики высотного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9.С. 23-27.
- [5] Toarlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam // Building & Environment. 2015. Vol 83. P. 79-90.
- [6] Wang X., Li Y. Predicting urban heat island circulation using CFD // Building and Environment. Vol 99. 2016. P. 82-97
- [7] Ogura Y., Charney J.G. A numerical model of thermal convection in the atmosphere. // Proc. Int. Symp. on Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan, Meteorological Society of Japan, 1962. P. 431–451.
- [8] Psiloglou B.E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N. Atmospheric Broadband Model for Computation of Solar Radiation at the Earth's Surface. Application to Mediterranean Climate // Pure appl. geophys. Vol. 157. 2000. P. 829 - 860

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ В ВИДЕ КОРОТКИХ ВОЛОКОН НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКРИЛОНИТРИЛА БУТАДИЕН СТИРОЛА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Лобов Е.С., Добрыднева А.Д., Ташкинов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
eslobov@pstu.ru, tiunova.anastasia@bk.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Целью данной работой является исследование механических характеристики образцов, произведенных трехмерной печатью из акрилонитрила бутадиен стирола (ABS) с добавленными армирующими элементами в виде коротких волокон, а также анализ их зависимости от параметров аддитивного производства с использованием экспериментальных данных и результатов численных расчетов.

Для определения свойств в соответствии со стандартом ISO 527-2:2012 были изготовлены образцы на растяжение из 4 видов пластика ABS: ABS с добавлением короткого углеволокна (ABS+CF), стекловолокна (ABS+GF) и базальтового волокна (ABS+BF), а также чистый ABS. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 68SC-5 с датчиком нагрузки 5 кН при постоянной скорости перемещения 0,5 мм/мин при температуре окружающей среды (~20°C).

Объемная доля армирующих элементов и их характерный диаметр были получены с использованием данных оптической микроскопии. На основе анализа микроструктуры образцов созданы модели представительных объемов геометрической (идеальной) модели, которые использовались для исследования эффективных свойств наполненных пластиков с помощью метода конечных элементов. В качестве характеристик матрицы в аналитической и численной модели использовались результаты испытаний чистого пластика ABS, полученные при печати соплом 0,4 и 0,8 мм. и углом заполнения 90°. Для получения численных моделей внутренней структуры образца и филамента использован метод компьютерной томографии. Полученные представительные объемы были дискретизированы с использованием тетраэдрических конечных элементов. Кроме того, для эффективных упругих свойств было получено аналитическое решение методом среднего поля в совокупности с походом гомогенизации Мори-Танака. Были получены модули упругости для каждой модели, результаты верифицированы с экспериментальными данными.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350).

ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ В УСТАНОВКЕ ТОПАЗ

Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь*

losev.g@icmm.ru, mad@icmm.ru

В данной работе экспериментально исследуется процесс кристаллизации модельной жидкости (сплава галлий-цинк-олово) в цилиндрическом объеме при воздействии охватывающего переменного магнитного поля. Технология ультразвуковой доплеровской анемометрии применяется не только для измерения профилей скорости вдоль области, но и для восстановления и анализа формы фронта кристаллизации.

Перемешивание жидких металлов в ходе процесса кристаллизации является важнейшим этапом металлургического производства, поскольку оказывает ключевое влияние на структуру и физические свойства слитков [1]. В силу высокой температуры плавления и химической активности подавляющего числа металлических расплавов наибольшее практическое распространение получили индукционные методы перемешивания, основанные на возбуждении в металле объёмных электромагнитных сил посредством воздействия переменных магнитных полей [2]. В частности, традиционными методами перемешивания жидких металлов является наложение бегущего или вращающегося магнитных полей [3].

Для создания перемешивающих течений применялся разработанный в лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН индуктор «Топаз», представляющий собой набор обмоток, размещенных на ферромагнитном сердечнике сложной формы, который окружает цилиндрическую область шириной 170 мм и высотой 340 мм в которую может быть помещена ячейка с жидким металлом. Катушки могут быть подключены в режимах вращающегося, бегущего магнитного поля и их сочетаний. Также возможно изменение углов между фазами трехфазного тока.

Торцевые стенки канала представляют собой плоские теплообменники и выполнены из луженой галлием меди. В верхнем теплообменнике имеется 5 цилиндрических отверстий, в которые герметично вклеены датчики ультразвукового доплеровского анемометра. Кристаллизация происходит снизу вверх.

В ходе работ были получены зависимости темпа и неоднородности фронта кристаллизации от фаз токов питания перемешивателя и топологии магнитного поля. Были восстановлены поля вертикальной компоненты скорости течений металлического расплава в двух взаимно перпендикулярных сечениях цилиндрического объёма.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Пермского края 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] S. Denisov, V. Dolgikh, and S. Khripchenko. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible. *Magnetohydrodynamics*, vol. 4 (2014), no. 4, pp. 249 — 265.
- [2] M. Avnaim, B. Mikhailovich, A. Azulay, and A. Levy. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 69 (2018), pp. 23 — 32.
- [3] H. K. Moffatt. Electromagnetic stirring. *Phys. Fluids A*, vol. 3 (1991), no. 5, pp. 1336 — 1343.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАНДАРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь*

losev.g@icmm.ru, mad@icmm.ru

Перемешивание жидких металлов в ходе процесса кристаллизации является важнейшим этапом металлургического производства, поскольку оказывает ключевое влияние на структуру отливок [1]. В силу высокой температуры плавления и химической активности подавляющего числа металлических расплавов наибольшее практическое распространение получили индукционные методы перемешивания, основанные на возбуждении в металле объёмных электромагнитных сил посредством воздействия переменных магнитных полей [2]. В частности, традиционными методами перемешивания жидких металлов является наложение бегущего или вращающегося магнитных полей [3]. Эти поля характеризуются последовательным равномерным изменением фаз токов в обмотках генерирующих индукторов.

Мы предлагаем новый способ воздействия и управления процессом кристаллизации металлического расплава, основанный на вариации фазных углов токов питания стандартного линейного индукционного перемешивателя. Экспериментальное рассмотрение задачи проводилось в прямоугольной плоской ячейке, расположенной вертикально над линейной индукционной машиной и заполненной легкоплавким галлиевым сплавом (температура плавления $+17^{\circ}\text{C}$). Продольный градиент температуры в слове создается при помощи двух медных теплообменников, расположенных на узких торцах ячейки. Измерения скорости течения жидкого металла, положения и формы фронта кристаллизации проводились при помощи ультразвукового доплеровского анемометра DOP 5000.

В ходе работы были получены поля продольной компоненты скорости течений и формы кристаллической фазы как функции времени в зависимости от фаз токов, питающих линейный индуктор. Получены характеристики интенсивности течений, скорости затвердевания металла и неоднородности фронта кристаллизации, позволяющие выбирать режим перемешивания в зависимости от требований практических приложений.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента № МК-5936.2021.1.2.

Литература

- [1] S. Denisov, V. Dolgikh, and S. Khripchenko. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible. *Magnetohydrodynamics*, vol. 4 (2014), no. 4, pp. 249 — 265.
- [2] M. Avnaim, B. Mikhailovich, A. Azulay, and A. Levy. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 69 (2018), pp. 23 — 32.
- [3] H. K. Moffatt. Electromagnetic stirring. *Phys. Fluids A*, vol. 3 (1991), no. 5, pp. 1336 — 1343.

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОМБИНИРОВАННОМ КАНАЛЕ В СИСТЕМЕ ДВОЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Лучинкин Н.А.^{1,2}, Разуванов Н.Г.^{1,2}, Полянская О. Н.^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Объединённый институт высоких температур (ОИВТ) РАН, Москва, Россия
LuchinkinNA@yandex.ru, nikita.razuvanov@mail.ru

Тяжелые жидкометаллические (ЖМ) теплоносители (свинец и его сплавы) рассматриваются для охлаждения активной зоны реакторов на быстрых нейтронах, экспериментальных модулей бланкета ИТЭР, бланкетов гибридного реактора (термоядерного источника нейтронов).

Геометрия бланкета предполагает сложные коробчатые конструкции системы теплообменных каналов, которые в отличие от труб плохо выдерживают нагрузки давления, температуры и деформации. Поэтому перспективны системы двойных каналов, когда конструкцию бланкета пронизывают трубы с текущим теплоносителем, а межтрубное пространство заполнено средой неподвижного ЖМ с невысоким давлением.

Существующий ЖМ комплекс, состоящий из трех ртутных МГД-стендов, расположенных в НИУ МЭИ и ОИВТ РАН позволяет изучать МГД и теплообмен в не исследованных ранее конфигурациях неизотермического течения. в продольном или поперечных магнитных полях. Применение зондовых методик измерений позволяет получать более надежные данные и переносить их методами подобия на реальные теплоносители, а также верифицировать расчетные коды.

В работе рассматривается комбинированный канал с двойными стенками «канал – труба» (рисунок 1): в трубе - вынужденное течение, в межтрубном пространстве – свободно-конвективное или магнитно-конвективное. Измерения проводились при однородном обогреве стенок канала, в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=(5-90) \cdot 10^4$, Грасгофа Gr до 10^8 , в поперечном МП с числами Гартмана $Ha=0-500$.

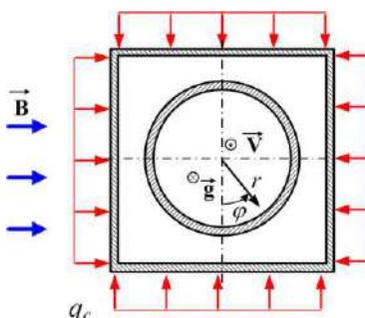


Рисунок 1 – Схема исследуемого канала в сечении

Выполнены серии экспериментов по измерению полей осредненной температуры и скорости, распределений температуры стенки по периметру канала и по длине, статистических характеристик пульсаций температуры. Результаты измерений представлены как для круглой трубы, так и для межтрубного пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-00878).

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЛОСКОГО ВИХРЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ВЕКТОРА СКОРОСТИ В КОНЕЧНОМ НАБОРЕ ТОЧЕК

Лысенко Ф.П., Говорухин В.Н.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

alen.kor@bk.ru, vgovorukhin@gmail.com

Предложен метод идентификации плоского вихря по известным векторам скорости в конечном наборе точек в области потока. Метод основан на построении модельного поля скорости, близкого к реальному. Для описания вихря используются классические математические модели – точечный вихрь и уравнения Эйлера динамики идеальной жидкости. В первом случае для модельного поля скорости имеется аналитическое выражение, а во втором оно строится численно как решение уравнения Пуассона, связывающее поле скорости и распределение завихренности в области течения. Величинами, подлежащими определению и характеризующими вихрь и порождаемое им течение, являются: для модели точечного вихря – его координата и интенсивность, для уравнений Эйлера – координаты центра вихревого пятна и вид распределения завихренности. Неизвестные величины определяются в результате безусловной минимизации функционала, связывающего известные векторы скорости и скорости модельных течений в тех же точках области на основе критерия близости векторных полей.

Представлены различные варианты реализации алгоритма метода. Предложены эмпирические критерии, связывающие исходные и модельные скорости, и используемые в качестве меры близости двух векторных полей. Для минимизации основанных на них функционалов использовались метод градиентного спуска, метод Ньютона и комбинированные стратегии. Для построения решения уравнения Пуассона применялся классический метод Бубнова-Галёркина.

В заключительной части доклада изложены результаты численных экспериментов, которые показали эффективность метода. В расчетах в качестве тестовых векторных полей использовались решения уравнений динамики невязкой несжимаемой жидкости в каналах, полученных с использованием спектрально-вихревого метода, и данные натурных и экспериментальных измерений и наблюдений. Опираясь на результаты численных экспериментов, можно говорить об эффективности предложенного метода. Алгоритм сходится при малом количестве известных векторов, центры вихревых пятен определяются верно, исходные и вычисленные поля скорости достаточно близки. Для использования модели точечного вихря выявлены ограничения на известные данные о поле скорости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00371.

Литература

- [1] Говорухин, В. Н. Алгоритм идентификации вихревых пятен на основе моделей точечных вихрей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2020. – № 3(207). – С. 11-18.
- [2] Говорухин В.Н., Филимонова А.М. Анализ структуры плоских вихревых течений и их изменений во времени // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 367-376.
- [3] Govorukhin V.N. An extended and improved particle-spectral method for analysis of unsteady inviscid incompressible flows through a channel of finite length // Int. J. Numer. Meth. Fluids. – 2022. – pp.1--24. <https://doi.org/10.1002/flid.5163>

ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ И ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НАПОЛНИТЕЛЯ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НИЗКО- И ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ КАУЧУКОВ

Любимова Н.Ю., Нуруллаев Э.М., Герцен Т.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ninalubimova@yandex.ru, ergnur@gmail.ru, tanger59perm@yandex.ru*

Актуальная проблема освоения Арктики и Крайнего Севера России - повышение эксплуатационного ресурса машин, механизмов, конструкций, а также дорожных покрытий. Решение этой проблемы - разработка материалов с характеристиками, соответствующими этим природным условиям. В работе рассмотрены морозостойкие (с температурой стеклования $\sim 170\text{K}$), эластичные (деформация не ниже 70% при $T \sim 223\text{K}$) полимерные композитные материалы на основе трехмерно сшитых эластомеров (низкомолекулярных и высокомолекулярных каучуков). Одним из факторов формирования необходимого комплекса свойств полимерных материалов является их наполнение. Наибольшее практическое применение получили твердые тонкодисперсные порошкообразные дисперсии органического или неорганического происхождения. Теоретический анализ зависимости механического напряжения от деформации [1] показал необходимость детального рассмотрения зависимости коэффициентов уравнения от объемной доли полимера в связующем и учет концентрации химических поперечных связей, необходимость выявления оптимальных соотношений фракций наполнителя. В качестве наполнителя выбран полифракционный диоксид кремния (кварцевый песок). При этом основным рецептурным параметром является эффективная степень объемного наполнения – отношение объемной доли твердых частиц наполнителя к предельной степени объемного наполнения, зависящая от формы частиц и фракционного состава, а также от физико-химического взаимодействия на границе «наполнитель– связующее». Активность наполнителя определяется формой и размером частиц, особенностями взаимодействия с полимером, особенностями взаимодействия между частицами наполнителя в среде полимера, содержанием наполнителя и другими факторами. Рассмотрено структурно механическое поведение эластомера в условиях одноосного растяжения. Предложенное авторами уравнение зависимости механического напряжения от деформации и разработанные авторами компьютерные программы, позволили исследовать влияние состава и ряда структурных параметров на механические характеристики изучаемого композита. Сравнение механических характеристик композитов на основе низкомолекулярных и высокомолекулярных каучуков, представлено на огибающих точек разрыва по Т.Л. Смитту [2]. При этом разрывное напряжение материала покрытия на основе высокомолекулярных каучуков на порядок выше в сравнении с низкомолекулярными.

Литература

- [1] Любимова Н.Ю., Ермилов А.С., Нуруллаев Э.М., Быкова Е.А. Оптимизация состава трехмерно сшитого эластомера по энергии механического разрушения // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – с.129-133.
[2] Smith T. L. Limited Characteristics of crosslink Polymers // J. Appl. Phys. – 1964. – No. 35. – P. 27-32.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОДНЫХ МАСС НА ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ВОДОЕМОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА

Любимова Т.П.¹, Лепихин А.П.², Паршакова Я.Н.¹, Богомолов А.В.², Ляхин Ю.С.², Исахов А.³

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Горный институт УрО РАН, Пермь*

³*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан*
lyubimovat@mail.ru, lepin49@mail.ru

Питьевое водоснабжение так же, как и техническое, как правило, осуществляется из поверхностных водных объектов. При этом в качестве основных требований, предъявляемых к источникам водоснабжения, являются возможный и гарантированный объем забора воды, а также не превышение нормативного содержания в ней лимитирующих примесей [1]. Априорно предполагается, что качество воды в водном объекте, по крайней мере по глубине водного объекта, достаточно однородно. Однако исследования, выполненные в последние годы, показывают, что данное требование выполняется далеко не всегда [2]. Наиболее распространённые механизмы формирования вертикальной плотностной неоднородности в водных объектах, расположенных в зонах активного техногенеза, связаны с разгрузкой высокоминерализованных рассолов, обусловленных как естественными факторами, так и процессами техногенеза. В ряде случаев дополнительное влияние может оказывать вертикальная температурная неоднородность водных масс. В качестве типичного примера устойчивой реализации плотностной стратификации воды является Верхне-Зырянское водохранилище, созданное для обеспечения технического водоснабжения калийных предприятий, расположенных в г. Березники. При проектировании данного технического сооружения не была учтена возможность фильтрационных разгрузок в данный водный объект. Выполненный комплекс натурных исследований и вычислительных экспериментов показал, что при низких скоростях течений в этих условиях формируется устойчивая вертикальная плотностная стратификация, оказывающая существенное влияние на характер забора воды требуемого качества. В условиях устойчивой плотностной стратификации для обеспечения устойчивости функционирования систем водоснабжения из данных объектов, необходим переход на селективные технологии забора воды. Существующая конструкция плотины не позволяет произвести эффективную «промывку» водохранилища, таким образом, нет возможности удалить высокоминерализованные воды, накапливаемые в придонных слоях. Поэтому для обеспечения устойчивого снабжения промышленного предприятия водами данного водохранилища, необходимо, как показали выполненные вычислительные эксперименты, провести реконструкцию существующих оголовков водозабора путем поднятия их отметки выше границы раздела водных масс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-41-590013 и № 20-45-596028) и Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/828.

Литература

- [1] СП 31.13330.2012 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* (с Изменениями N1-5) Свод правил от 29.12.2011 N31.13330.2012.
- [2] Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Konovalov, V.; Tiunov, A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrology. – 2014. – V.508. – P.328–342.
- [3] Lyubimova, T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N. Numerical simulation of wastewater discharge into water objects to improve discharge devices // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2020. – V. 61. – P. 203–209.

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ, НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ, ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ГРАДИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Любимова Т.П.^{1,2}, Шубенков И.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
lyubimovat@mail.ru, shubenkovis@yandex.ru

В работе исследуются возникновение и нелинейные режимы тепловой конвекции в наклонном пористом слое, насыщенном жидкостью. В большинстве работ, посвященных исследованию этой проблемы, на границах слоя задаются постоянные разные температуры. При таких граничных условиях механическое равновесие невозможно и исследуются вторичные режимы конвекции, возникающие после потери устойчивости основного стационарного движения. В настоящей работе рассматриваются возникновение и нелинейные режимы конвекции при строго вертикальном градиенте температуры. Эта проблема важна для геологических приложений. Линейная устойчивость механического равновесия насыщенного жидкостью наклонного пористого слоя при вертикальном градиенте температуры по отношению к двумерным возмущениям изучалась ранее в [1].

В настоящей работе исследуются линейная устойчивость механического равновесия по отношению к трехмерным возмущениям и трехмерные нелинейные режимы конвекции, возникающие после потери устойчивости равновесия. Линейная задача решается численно путём построения фундаментальной системы решений, нелинейная задача – с использованием пакета программ Ansys Fluent. В нелинейных расчетах используется равномерная прямоугольная сетка с числом узлов $25 \times 125 \times 125$. Анализ линейной устойчивости показал, что при любых углах наклона слоя наиболее опасными являются возмущения в форме валов с осями, параллельными оси z (продольных валов).

Трёхмерные нелинейные расчёты подтвердили предсказания линейного анализа устойчивости: при любом угле наклона слоя независимо от начальных условий после переходного процесса устанавливается конвективное движение в виде продольных валов. Численные данные о критическом числе Рэлея и критическом волновом числе также согласуются с результатами линейной теории устойчивости. Нелинейные расчеты, проведенные для значений числа Рэлея, близких к пороговому, показали, что имеет место мягкий характер возникновения конвекции. Для каждого угла наклона слоя обнаружен только один конвективный режим, предсказанный линейной теорией. При использовании различных начальных условий и вплоть до двукратной надкритичности переходов на другие конвективные режимы не обнаружено. Надкритические режимы конвекции, возникающие после потери устойчивости механического равновесия, характеризуются наличием ненулевой составляющей скорости вдоль оси z . При этом траектории частиц жидкости представляют собой окружности, в плоскости которых лежит вектор силы тяжести, и вектор нормали к которым направлен в сторону оси z , но смещён от неё на определённый угол. С ростом надкритичности этот угол увеличивается.

Литература

[1] Колесников А.К., Любимов Д.В. О конвективной неустойчивости жидкости в наклонном слое пористой среды // ПМТФ. – 1973. – №3. – С. 127-131.

ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕХОДА В ПРЯМОЙ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ

Макаревич Е.С., Подседерцев А.Н., Кондратьев Н.С., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
makareviches@inbox.ru, stevenmoore@yandex.ru, kondratevns@gmail.com,
tpv@matmod.pstu.ac.ru

Рассматриваются вопросы построения многоуровневой конститутивной модели для описания мартенситных превращений в поликристаллических металлах и сплавах при термомеханических воздействиях. Для анализа на мезомасштабном уровне формирующейся в процессе деформирования структуры материала разрабатывается прямая упруговязкопластическая физическая модель [1]. В рамках применяемого подхода структурные элементы мезоуровня (кристаллиты, являющиеся фрагментами зерен) аппроксимируются конечными элементами. Каждый структурный элемент полагается имеющим фиксированные на рассматриваемом временном срезе материальные свойства (включая кристаллическую решетку), которые могут изменяться в результате изменения дефектной структуры и фазовых превращений. При моделировании кристаллит рассматривается как однородная термомеханическая система, сопряжение которой с окружающей средой осуществляется по кинематическим переменным и температуре, а материал рассматривается как локально равновесная система с диссипацией [2].

Ключевой задачей в рамках прямого моделирования процесса мартенситного перехода является формулировка критерия фазового превращения для структурного элемента. В большинстве работ, проанализированных авторами, в качестве внутренних переменных конститутивной модели материала используются доли новой фазы в представительном объеме с формулировкой для описания их изменения кинетических уравнений. В отличие от традиционных подходов, целью данной работы является прямое описание процесса изменения структуры материала на мезоуровне с возможностью непосредственного анализа формируемой в ходе термомеханической обработки мезоструктуры и исследование зависимости изменения этой структуры от параметров воздействия (механической нагрузки и температуры). В качестве базовой используется многоуровневая конститутивная модель материала [3]. Для описания фазового перехода принимается критерий, основанный на введении термодинамической движущей силы полиморфного превращения, вычисляемой для элемента в каждый момент процесса. Обсуждаются вопросы применимости конкретных вариантов критерия мартенситного перехода в рамках предложенной структуры модели материала, а также возможные способы их модификации. Тестовые расчеты с использованием модели проведены для аустенитных нержавеющей сталей на примере стали марки 08X18H10 в пакете прикладных программ конечно-элементного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596002).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Прямые модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – №14 (5). – С.5-30.
- [2] Князева А.Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. – Томск: Издательство «Иван Федоров», 2014. – 172 с.
- [3] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с.

ВОЛНОВЫЕ МОДЕЛИ ГЛУБОКОВОДНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Макаренко Н.И.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
makarenko@hydro.nsc.ru*

Придонные холодные течения, формирующиеся в полярных областях и направленные к экватору, являются в настоящее время объектом активного изучения в океанологии [1]. Исследование структуры и динамики этих потоков тесно связано с развитием методов математического моделирования [2], базирующихся на результатах натурных измерений. Задачи о расслоенных течениях являются существенно многопараметрическими, поэтому продуктивным здесь оказывается путь построения иерархии приближенных моделей, позволяющих описать характерные свойства рассматриваемого класса явлений. Этот класс включает такие эффекты, как блокировка стратифицированного потока донным препятствием и генерация волновых следов за ним, формирование гидравлических прыжков и критических слоев, расщепление присклонных течений. Ряд недавних новых результатов относится к задаче о распространении внутренних волн с учетом аномально слабой глубоководной стратификации [3-5]. В рамках построенной нелинейной дисперсионной модели длинноволнового приближения охарактеризованы параметрические области существования внутренних стационарных волн и рассмотрены механизмы возникновения сдвиговой неустойчивости в придонных расслоенных течениях.

Данные исследования поддерживаются грантом РФФ 21-71-20039 «Глубоководная гидродинамика: математические модели и натурный эксперимент».

Литература

- [1] Morozov E., Tarakanov R., Demidov A., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: water structure and flows. Dordrecht: Springer, 2010.
- [2] Gavriluk S.L., Makarenko N.I., Sukhinin S.V. Waves in Continuous Media / Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing. Cham, Switzerland: Birkhauser, 2017.
- [3] Makarenko N.I., Maltseva J.L., Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ivanova K.A. Internal waves in marginally stable abyssal stratified flows // Nonlin. Processes Geophys. 2018. V.25. P. 659–669.
- [4] Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю., Иванова К.А. Внутренние стационарные волны в глубоководных стратифицированных течениях // ПМТФ. 2019. Т.60, №2. С. 74–83.
- [5] Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л., Черевко А.А. Внутренние волны в двухслойных стратифицированных течениях // ПМТФ. 2022. Т.63, №6. С. 135–144.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН В ТРЕХМЕРНОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИН

Максеев А.Е.¹, Жигалов М.В.², Крысько В.А.²

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов

² Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

makseev.anton@mail.ru, zhigalovm@ya.ru, tak@san.ru

Построена математическая модель идентификации формы и расположения трещин в трехмерных пластинах на основе методов топологической оптимизации. Численное решение прямых задач получено методом конечных элементов, процесс идентификации проводился на основе метода SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty) [1,2]. Исследована сходимость метода конечных элементов как по основным функциям, так и по их производным. Достоверность результатов подтверждена тем, что максимальная разность между результатами не более 0.5 %, т. е. можно утверждать, что получены почти точные решения. Идентификация трещин производится с помощью воздействия на трехмерную пластину теплового потока. Предложенные методы не требуют первоначальной информации о месте расположения и форме трещин.

Численные результаты идентификации приведены для нескольких типов трещин, их расположения (внутренние и с выходом на поверхность) и геометрии пластины. Полученные результаты показывают надежность и точность предложенного авторами подхода.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № №22-11-00160, <https://rscf.ru/project/22-11-00160>.

Литература

[1] Bendsøe, M. P. (1989). "Optimal shape design as a material distribution problem". Structural Optimization. 1 (4): 193–202. doi:10.1007/BF01650949. S2CID 18253872.

[2] Krysko, A.V.; Makseev, A.; Smirnov, A.; Zhigalov, M.V.; Krysko, V.A. A New Approach to Identifying an Arbitrary Number of Inclusions, Their Geometry and Location in the Structure Using Topological Optimization. Appl. Sci. 2023, 13, 49.

МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОГО НАТРИЯ

Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь*

mad@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Численно изучены возможности и ограничения метода температурных корреляций для определения средней скорости течения жидкого натрия, генератором температурных пульсаций в котором выступает магнитное препятствие. Измерение скорости в жидких металлах, представляют собой сложную задачу из-за непрозрачности и агрессивности таких сред. Различные методы, обычно используемые для измерения скорости потока, не применимы в жидких металлах или требуют значительной модификации. Метод температурных корреляций является интуитивным и возникает естественным образом в задачах с множеством точек измерения температуры жидкой среды. Серьезное развитие было связано с исследованиями, посвященными атомной отрасли в 1970-х [1]. Данный метод является абсолютным, а также, что немаловажно, не чувствителен к магнитным полям [2].

Необходимым условием работы метода является наличие в жидкой среде температурных неоднородностей, которые перемещаются вместе с потоком. Проходя последовательно через два датчика температуры, они вызывают всплески сигналов на этих датчиках с некоторой задержкой по времени. Используя кросскорреляционный анализ можно узнать величину этой задержки и определить среднюю скорость потока в пространстве между датчиками.

В результате вариации параметров в численном счёте было получено, что метод работает в достаточно большом диапазоне величин пульсаций температуры и скорости. Наибольшую погрешность создают пульсации продольной компоненты скорости – функция кросскорреляции размывается, точность падает, метод начинает занижать скорость. Магнит малого диаметра (менее половины диаметра трубы) более предпочтителен, т.к. его более концентрированное магнитное поле лучше тормозит жидкость и создает более турбулизованый поток сразу за магнитным препятствием. Вариация величины магнитного воздействия позволяет эффективно изменять и задавать уровень пульсаций температуры и скорости, а также управлять протяженностью и положением зоны смешения. Вариация температуры стенки приводит в основном к изменению величины пульсаций температуры в потоке и формированию выделенной зоны смешения при большой разности температур между стенкой и натрием на входе в трубу. Изменение разности температур на 150С приводит к изменению СКО температуры в 5 раз. Однако это практически не влияет на работоспособность и точность метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

- [1] J. Benkert, C. Mika, K.H. Raes, D. Stegemann, Determination of thermocouple transfer-functions and fluid-flow velocities by temperature-noise measurements in liquid sodium, Progress of Nuclear Energy 1 (2) (1977) 553–563.
- [2] I.A. Belyaev, N.G. Razuvaev, V.G. Sviridov, V.S. Zagorsky Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 55, 2017, Pages 37-43.

РАЗВИТАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОТОКАХ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕ

Мамыкин А.Д., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь*

mad@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Производство сплавов с особыми свойствами является одной из приоритетных областей металлургии в наши дни. Перемешивание металлов в ходе процесса кристаллизации приводит к повышению механической прочности слитков, гомогенизации распределения примесных включений и измельчению зерна металла [1]. На практике распространение получил метод бесконтактного перемешивания металла за счёт приложения бегущих или вращающихся магнитных полей в замкнутых объёмах [2] или в процессе транспортировки металла через технологические каналы. Бесконтактная генерация потока расплавленного металла полезна при непрерывном литье. Кроме того, широко исследуется применение перемешивателей для изготовления цилиндрических слитков на машинах полунепрерывного литья алюминия [3].

Для создания перемешивающих течений применялся разработанный в лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН индуктор, представляющий собой набор обмоток, размещенных на ферромагнитном сердечнике сложной формы, который окружает цилиндрическую область шириной 170 мм и высотой 340 мм в которую может быть помещена ячейка с жидким металлом. В качестве жидкого металла использовался галлиевый сплав. Катушки были подключены в режиме вращающегося магнитного поля. Возникающее крупномасштабное течение достигало азимутальной скорости 2 м/с, что даёт число Рейнольдса порядка $6.5 \cdot 10^5$ при токе на катушке 1.5 А (18 А на фазу). Для измерения характеристик турбулентности скорости таких потоков и их амплитуд использовались кондукционные датчики скорости. Кондукционный датчик скорости представляет собой неодимовый магнит, окруженный двумя парами электродов. Одна часть электродов погружается в жидкий металл, другая часть подключается к усилителю. Все разработанные КДС прошли калибровку на специальном стенде. В нашей конфигурации экспериментальной установки три КДС измеряют в пристеночной области как величину аксиальной, так и вертикальной компоненты локальной скорости течения жидкого металла. При помощи таких датчиков были получены спектры пульсаций азимутальных и полоидальных компонент скорости на разной высоте цилиндрической ячейки. На полученных графиках спектров явно присутствует инерционный интервал, занимающий до двух декад в частотном диапазоне (2–100 Гц для тока 0.4 А, 30–1000 Гц для тока 1.6 А). При этом видно, что данный интервал сдвигается в область высоких частот с увеличением электромагнитного воздействия, делая частотный интервал от 10 до 1000 Гц более наполненным. Дальнейший анализ графиков спектров позволяет выделить хорошо различимые пики на частотах 1.24, 2.58 и 9.20 Гц соответствующие основной частоте вращения (перемешивания) жидкого металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Пермского края 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A. et al. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys // Metall. Mater. Trans. B. 2008. Vol. 39. N. 2. P. 304–316.
- [2] Moffatt H. K. Electromagnetic stirring // Phys. Fluids A. 1991. Vol. 3, N. 5. P. 1336–1343.
- [3] Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni M. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine // J. Mater. Process. Technol. 2010. Vol. 210, N. 2. P. 306–314.

БОЛЬШОЙ ОЛОВЯННО-СВИНЦОВЫЙ СТЕНД ИМСС УРО РАН

Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Халилов Р.И., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь*

mad@icmm.ru, losev.g@icmm.ru, halilov@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Очищение металлов от примесей, равно как и улучшение физических и прочностных свойств сплавов являются важнейшими задачами металлургии. Проблема заключается в том, что существующие методы очистки путём отстаивания, барботирования и применения флюсов дороги и недостаточно эффективны. Жидкие металлы применяются в атомной промышленности в качестве теплоносителей, где также остро стоит проблема удаления из них оксидов и других примесей. Примеси влияют на свойства расплавленного металла, который используется в качестве теплоносителя на атомных электростанциях на быстрых нейтронах, изменяя теплоемкость, теплопроводность и электропроводность, что влияет на общий отвод тепла от реактора [1]. Высокая электропроводность жидких металлов открывает возможность применения методов очистки, основанных на электродинамических процессах. Жидкий металл подвергается воздействию электрического тока и магнитного поля, и электромагнитная сила по-разному действует на фазы среды, имеющие разную электропроводность. Ключевой особенностью технологии электромагнитной сепарации является возможность создания сепарирующих электромагнитных сил в жидком металле бесконтактным способом, что позволяет использовать простые герметичные каналы, а также делает ненужным применение механических фильтров для отделения включений [2,3].

В лаборатории технологической гидродинамики был разработан и создан МГД-стенд для изучения процесса очищения жидкого металла от примеси и его дальнейшей кристаллизации в цилиндрические слитки. В состав стенда входят: контур для осуществления процесса сепарации (механизм воздействия – кондукционный); система разливки, перемешивания и кристаллизации (механизм воздействия – индукционный); система контроля за процессами и рама для транспортировки. Контур для осуществления процесса сепарации включает в себя: бак для перемешивания примеси (установлен над линейной индукционной машиной); замкнутый контур прямоугольного сечения; трансформатор тока для наведения в контуре переменного тока; электромагнитный кондукционный насос для создания транзитного течения; кондукционный расходомер, для контроля расхода жидкого металла; сепарационную ячейку с ферромагнитными сердечниками, осуществляющую разделение фаз за счёт разницы в их электропроводности; автоматическую систему нагрева. Система разливки, перемешивания и кристаллизации содержит в себе: индукционный насос бегущего поля, осуществляющий транспорт жидкого металла к узлу кристаллизации; индукционный перемешиватель, позволяющий производить МГД-воздействие на цилиндрический объём металла бегущими и вращающимися магнитными полями, а также их комбинациями; кристаллизатор с подвижным дном, делающий возможным процесс непрерывного или полунепрерывного литья.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] В. И. Субботин, П. Л. Кириллов, Ф. А. Козлов, Очистка натрия от кислорода. Контроль за содержанием кислорода в натрии // ТВТ, 1965, том 3, выпуск 1, 154–163.
- [2] И.Л. Повх, А.Б. Капуста, Б.В. Чекин. Магнитная гидродинамика в металлургии - Москва: Металлургия, 1974. - 240 с.
- [3] S. Makarov, R. Ludwig, D. Apelian, Electromagnetic separation techniques in metal casting. i. conventional methods, IEEE Transactions on Magnetics 36 (2000) 2015–2021.

ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА НА КОНВЕКТИВНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЗАКУПОРКИ

Марышев Б.С.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
bmaryshev@mail.ru., lyudmilaklimenko@gmail.com*

Транспортные процессы в пористой среде сопровождаются взаимодействием примеси с твердой матрицей среды, что замедляет процессы транспорта. Наиболее популярным в настоящее время подходом к описанию такого транспорта является МИМ (mobile/immobile media) подход. Для значительных концентраций примеси необходимо использовать нелинейный вариант МИМ модели с Ленгмюровской изотермой сорбции в случае, когда достигнуто динамическое равновесие [1]. Стоит заметить, что описываемый транспортный процесс имеет обратное влияние на фильтрационный поток флюида через пористую среду. Само наличие неподвижной фазы сокращает объем пор, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления среды или падению проницаемости, этот эффект описывается с помощью соотношения Козени-Кармана [2]. Фильтрация описывается с помощью стандартной модели Дарси-Буссинеска [3].

В рамках описанной модели решена задача о влиянии пульсаций потока на устойчивость однородного течения через горизонтальный слой пористой среды. Границы слоя считаются непроницаемыми и между ними задается постоянный перепад концентрации примеси. Путем специального выбора системы отсчета для давления удалось свести влияние пульсаций к модуляции числа Пекле. Показано, что задача допускает решение в виде пульсационного горизонтального переноса примеси. В случае, когда закупорка пористой среды значительна, равновесный вертикальный профиль концентрации искривляется. Искривление тем значительнее, чем выше значения коэффициента адсорбции и параметра закупорки.

Исследована линейная устойчивость полученного решения по отношению к малым двумерным возмущениям. Получены нейтральные кривые в пространстве параметров системы, построены карты устойчивости. Показано, что зависимости критического числа Релея-Дарси и критической амплитуды пульсаций от частоты имеют характерный вид «мешков», которые часто наблюдаются в случае параметрического возбуждения колебаний. Это объясняется тем, что в отсутствие пульсаций наблюдается колебательная неустойчивость режима однородной прокачки. Установленный характер неустойчивости пульсационного потока позволяет говорить о возможности эффективного управления устойчивостью одномерного решения путем контроля амплитуды и частоты пульсаций, более того, возможен контроль частоты возникающих выше порога колебаний концентрации, поскольку установлены области возникновения субгармонического и синхронного отклика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-11-20125).

Литература

- [1] Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models //Environmental Health Perspectives. 1989. V. 83. P. 69-75.
- [2] Carman P. C. Fluid flow through granular beds //Trans. Inst. Chem. Eng. 1937. V. 15. P. 150-166.
- [3] Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. – Springer, Cham, 2017. – 988 с.

ГЕМОДИНАМИКА БИФУРКАЦИОННОЙ АНЕВРИЗМЫ АБДОМИНАЛЬНОГО ОТДЕЛА АОРТЫ

Мержоева Л.Р.¹, Тихвинский Д.В.¹, Паршин Д.В.¹, Чупахин А.П.¹

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

l.merzhoeva@g.nsu.ru, d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Бифуркационные аневризмы абдоминального отдела аорты являются широко распространенным заболеванием: от 1.5% до 5% людей старше 65 лет имеют данную патологию [1]. Основными задачами современной сосудистой хирургии абдоминальных аневризм являются определение риска их разрыва и минимизации послеоперационных рисков). Целью данной работы является изучение гемодинамики бифуркационной аневризмы абдоминального отдела аорты. В последнее десятилетие для решения обозначенных проблем всё чаще применяются методы предоперационного моделирования, в частности вычислительная гидродинамика (CFD), в особенности подходы FSI [2].

Геометрические (DICOM-изображения) и гемодинамические параметры системы предоставлены Национальным медицинским исследовательским центром имени академика Е. Н. Мешалкина. Расчеты проводятся с использованием пакета ANSYS 2020 R2.

В результате проведенного исследования оказалось, что реальное распределение диаметров проксимального, по отношению к аневризме, отдела аорты и диаметров подвздошных артерий отличается от предсказанного по закону Мюррея [3] примерно на 20% и является статистически значимым. Обнаружено уменьшение значений нормированной функции диссипации с увеличением радиуса аневризмы, что может служить потенциальным маркером разрыва аневризмы. А также был показан рост давления выше аневризмы по потоку, что может трактоваться, как известное ретроградное влияние абдоминальной аневризмы на сердечную деятельность [4].

Полученные результаты планируется применять для дальнейшего развития и верификации авторского комплексного предсказательного фреймворка – ассистента принятия врачебных решений. Мы считаем, что для этого необходимо обладать как результатами большого массива расчетов на элементарных конфигурациях (для улавливания общих эффектов), так и расчетов в пациент-специфической постановке (для разбора особенностей той или иной конфигурации).

Работа выполнена в рамках госзадания по теме FGWW-2021-0009.

Литература

[1] Wanhainen A., et al. European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2019 Clinical Practice Guidelines on the Management of Abdominal Aorto-iliac Artery Aneurysms – European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2018.

[2] Xenos M., Labropoulos N., Rambhia S., Alemu Y., Einav S., Tassiopoulos A., et al. Progression of abdominal aortic aneurysm towards rupture: refining clinical risk assessment using a fully coupled fluid-structure interaction method – Annals of Biomedical Engineering, 2015; 43(1): p. 139-153.

[3] Hari Hara Sudhan Lakshmanan, Joseph J. Shatzel, Sven R. Olson, Owen J.T. McCarty, Jeevan Maddal. Modeling the effect of blood vessel bifurcation ratio on occlusive thrombus formation – Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2019; 22(11): p. 972–980.

[4] Georgakarakos E., Ioannou C.V., Kamarianakis Y., Papaharilaou Y., Kostas T., Manousaki E., Katsamouris A. N. The role of geometric parameters in the prediction of abdominal aortic aneurysm wall stress – Eur J. Vasc. Endovasc. Surg., 2010; 1: p. 42-48.

ДИНАМИКА И РЕСУРС УНИВЕРСАЛЬНЫХ ШАРНИРОВ В КАРДАНЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Митюшов Е.А., Ламоткин А.Е.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Карданные передачи находят широкое применение в качестве трансмиссий в автомобилестроении, сельскохозяйственном и транспортном машиностроении, в металлургическом производстве. Их исследованию в последние годы посвящено достаточно большое количество работ. Основным узлом карданной передачи является универсальный шарнир, который обеспечивает передачу вращения валов с пересекающимися осями. Экспериментальные исследования показывают, что ресурс универсального шарнира до 75% обуславливает ресурс и эксплуатационные характеристики передачи в целом.

Целью работы является полное описание динамики универсального шарнира, позволяющее проводить оценку возникающих контактных напряжений в его вращательных кинематических парах с учетом инерционных характеристик крестовины.

В работе [1] впервые предложен метод анализа динамических нагрузок в универсальных шарнирах. Показано, что учет инерционных характеристик крестовины приводят к существенному увеличению величины момента, действующего на шипы, контактирующие свилкой ведомого вала. Определена зона контакта и исследован нестационарный характер возникающих контактных напряжений.

Продолжением этих исследований является определение контактных напряжений в шарнире с использованием формулы Герца и определение его ресурса с учетом всех параметров конкретного машинного агрегата.

Литература

[1] Митюшов Е.А., Мисюра Н.Е., Ламоткин А.Е., Раскатов Е.Ю. Моделирование кинематики и динамики шарнира неравных угловых скоростей // *Computational Nanotechnology*. – 2022. – Т. 9, № 4. – С. 48–54. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-48-54

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИУРЕТАНОВ С РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТВЕРЖДЕНИЯ

Морозов И.А., Беляев А.Ю.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
imorozov@icmm.ru, belyaev@icmm.ru

Полиуретаны – широкий класс неоднородных полимеров, на уровне наноструктуры состоящих из жестких блоков, вплетенных в более мягкую матрицу. В настоящей работе исследовали эластичные полиуретаны с начальным модулем упругости порядка 6 МПа.

Методы высокоскоростной индентации атомно-силовой микроскопии позволяют получать карты рельефа и физико-механических свойств материала в высоком разрешении. Анализ контактного взаимодействия зонда с поверхностью полиуретана в зависимости от прилагаемого усилия показал, что неоднородная структура полимера (спутанные жесткие фибриллярные наноструктуры) скрыта мягким однородным поверхностным нанослоем. Установлено, что изменение температуры отверждения полимерной смеси в диапазоне от 30 °С до 90 °С влияет на структурные и физико-механические свойства как поверхности (толщина и жесткость поверхностного нанослоя, энергия поверхности, шероховатость), так и подповерхностных структур (модуль упругости и однородность распределения жестких блоков). В частности, снижение температуры отверждения ведет к более тонкому поверхностному нанослою и более однородному распределению жестких подповерхностных наноструктур.

Полученные данные объясняют макроскопические физико-механические свойства полиуретанов, а также могут быть использованы при интерпретации результатов модификации поверхности полимеров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-22-00064.

КЛАССИФИКАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЗРЫВНОЙ СПОСОБ РАЗРАБОТКИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Морозова К.Г., Беседина А.Н., Остапчук А.А.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва
morozova@idg.chph.ras.ru*

В работе представлен новый метод классификации акустических и микросейсмических импульсов КЛАСИ-к, основанный на анализе параметров волновой формы (скорость нарастания амплитуды – RA , средняя частота – AF , волновой индекс – WI). В основе метода КЛАСИ-к лежат результаты лабораторных акустоэмиссионных исследований по формированию структурных нарушений сплошности и их эволюции [1, 2] и алгоритм кластеризации k -средних [3]. Предложенный метод позволяет выделить подмножества событий, различающиеся величиной приведенной сейсмической энергии (отношение излученной сейсмической энергии к реализованному сейсмическому моменту) и характерным временем в очаге.

При классификации сейсмических событий существует принципиальная возможность использовать в качестве целевых параметров алгоритма – параметры очага: сейсмическая энергия E_s , сейсмический момент M_0 , угловая частота f_0 . При этом наблюдается хорошее соответствие между типами событий при переходе от параметров волновой формы $\{RA, AF, WI\}$ к очаговым параметрам $\{E_s, M_0, f_0\}$.

Метод КЛАСИ-к апробирован на данных шахтной сейсмичности, индуцированной двумя массовыми взрывами на шахте «КМАруда» в пределах Коробковского железорудного месторождения. Анализируемые каталоги включают 77 микрособытий, зарегистрированных после массового взрыва 06.07.2019 г, и 259 события после взрыва 24.10.2020 г. Применение метода КЛАСИ-к позволяет выделить в каталогах два подмножества. Первое подмножество характеризуется величиной приведенной сейсмической энергии (E_s/M_0) более 10^{-7} Дж/(Н·м), второе – менее 10^{-7} Дж/(Н·м). При этом события первого типа характеризуются меньшей длительностью в очаге, чем события второго типа при одном и том же реализованном сейсмическом моменте.

Выявление особенностей ансамбля сейсмических импульсов, излучаемых в локальной области массива горных пород, позволяет лучше понять динамику процессов эволюции, протекающих в массиве горных пород. Предложенный в настоящей работе метод КЛАСИ-к является эффективным инструментом дискриминации сейсмических событий и позволяет выделять подмножества, характеризующиеся различием приведенной сейсмической энергии и временем в очаге. Применение метода КЛАСИ-к позволило экспериментально показать на данных шахтной сейсмичности, что события с более высоким значением приведенной сейсмической энергии характеризуются меньшими временами в очаге при одинаковой величине сейсмического момента. Выделение «тонкой структуры» ансамбля излучаемых сейсмических событий является принципиальным при анализе напряженного состояния локальной области структурных нарушений массива горных пород [4].

Литература

- [1] Ohno K., Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission // Construction and Building Materials. – 2010. – V.24(12). – P. 2339–2346.
- [2] Ostapchuk A., Morozova K., Markov V., Pavlov D. and Popov M. Acoustic Emission Reveals Multiple Slip Modes on a Frictional Fault // Front. Earth Sci. – 2021. – V. 9. – P.657487.
- [3] Hartigan J.A., Wong. M.A. A K-Means Clustering Algorithm //Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). – 1979. – V. 28, N 1. – P. 100-108.
- [4] Ostapchuk A.A., Morozova K.G. On the Mechanism of Laboratory Earthquake Nucleation Highlighted by Acoustic Emission // Sci. Rep. – 2020. – V. 10. – P. 7245.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ СО СЛОЖНЫМ АЛГОРИТМОМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Мохирева К.А.¹, Свистков А.Л.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
lyadovaka@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

Предложена дифференциальная модель для описания вязкоупругих свойств полимерных нанокомпозитов в испытаниях со сложной историей деформирования. Известно, что на характер поведения наполненных эластомеров влияет множество факторов (скорость нагрузки, повторяемость нагрузки, уровень максимальной заданной деформации, задание временных остановок для завершения основных переходных процессов и другие). Мы работаем в рамках испытаний с вложенными циклами. Это позволяет фиксировать вязкоупругое поведение размягченного материала при разных (но постоянных на каждом полном цикле) скоростях нагрузки, а также определить упругое поведение эластомеров путем задания временных остановок в процессе деформирования образца. Таким образом, мы можем разделить решение нашей задачи на две подзадачи – задание упругого потенциала для оценки равновесного состояния и нахождение компонент тензора напряжений, отвечающего за диссипативные процессы в материале, а также учесть влияние эффект размягчения Маллинза в каждой из подзадач. Отметим, что в литературе [1-4] предлагается описывать эффект размягчения лишь в равновесной части тензора напряжений. Поэтому в рамках данной работы было усовершенствовано уравнение для определения неупругой (диссипативной) части тензора напряжений. Полученная модель была применена для высоконаполненных полимерных систем в случае одноосного нагружения с разными, но постоянными на каждом цикле скоростями деформирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7).

Литература

- [1] Fazekas B., Goda T.J. Constitutive modelling of rubbers: Mullins effect, residual strain, time-temperature dependence // International Journal of Mechanical Sciences. – 2021. – V. 210. – p. 106735. doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106735
- [2] Zhu P., Zhong Z. Constitutive modelling for the mullins effect with permanent set and induced anisotropy in particle-filled rubbers // Applied Mathematical Modelling. – 2021. – V. 97. – pp. 19-35. doi: 10.1016/j.apm.2021.03.031
- [3] Zhong D., Xiang Y., Yin T., Yu H., Qu S., Yang W. A physically-based damage model for soft elastomeric materials with anisotropic Mullins effect // International Journal of Solids and Structures. – 2019. – V. 176-177. – pp. 121-134. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.05.018
- [4] Diani J., Le Tallec P. A fully equilibrated microsphere model with damage for rubberlike materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – V. 124. pp. 702-713. doi:10.1016/j.jmps.2018.11.021

ВЫБОР СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ЭФФЕКТ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИИ

Мошева Е.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mosheva@icmm.ru*

Самым распространенным способом лабораторного моделирования гидродинамики и массообменных процессов в условиях микрогравитации является снижение интенсивности свободно конвективного течения путем уменьшения вертикального размера исследуемого объема жидкости. Однако, такое уменьшение возможно лишь до определенных пределов. Во-первых, при использовании оптических методов исследования ограничения накладываются размеры полости и экспериментальной установки; во-вторых, рост влияния краевых условий не должен изменять характер изучаемого течения. В-третьих, должны сохраняться области преобладания различных механизмов движения жидкости гравитационной и негравитационной природы. Невыполнение хотя бы одного из этих условий ведет к нарушению устойчивости модельной системы.

Еще один способ снижения интенсивности конвекции заключается в уменьшении исходного перепада плотностей жидкостей в системе. Если все жидкости неравновесной системы имеют равную плотность, то кажется логичным, что их взаимная диффузия не должна приводить к локальному изменению плотности. Однако, реализации такого сценария на практике препятствуют два эффекта. Первый из них – контракция, вызывающая изменение плотности за счет изменения структуры раствора при вариации концентрации его компонентов; второй эффект – двойная диффузия, обусловленная разной скоростью молекулярной диффузии растворенных в системе веществ. Опережающее проникновение молекул с большей скоростью диффузии может привести к развитию неустойчивости зоны смешивания даже в устойчиво стратифицированной по плотности системе.

В докладе подробно обсуждается механизм формирования неустойчивости двойной диффузии в смешивающихся устойчиво стратифицированных двухслойных системах. Исследуемые пары жидкостей образованы водными растворами органических и неорганических соединений и неводными растворами одноатомных спиртов. В докладе приводятся результаты визуализации процесса смешения жидкостей, а также обсуждается вопрос о перспективности выбранных пар жидкости с точки зрения их использования в качестве модельных систем для лабораторного моделирования массообменных процессов в условиях микрогравитации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-41-590009.

СМЕШЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИИ В ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Мошева Е.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mosheva@icmm.ru

Микроканалы проточного типа широко распространены в различных производственных отраслях, включая химическую и фармакологическую промышленность. Главным достоинством микроканалов является их размер, благодаря малости которого технологические процессы, обуславливающие синтез новых химических соединений, становятся менее затратными и более энергоэффективными. Одной из главных задач микрофлюидики является обеспечение минимальной длины смешения прокачиваемых жидкостей при их максимальном расходе. В земных условиях в качестве инструмента смешения могут служить гравитационно-зависимые типы неустойчивости, например, конвекция Рэлея-Тейлора или неустойчивости семейства двойной диффузии [1]. Ранее было продемонстрировано, что конвекция Рэлея-Тейлора и двойной диффузии на порядок превышают по эффективности смешения диффузионные механизмы [2], в то время как конвекция диффузионного слоя, в силу своей особой структуры, наоборот, препятствует смешению и не может являться самостоятельным инструментом гомогенизации. В данной работе экспериментально исследуется влияние смешанного типа неустойчивости, возникающего при одновременном развитии конвекции Рэлея-Тейлора и одного из типов неустойчивости двойной диффузии, на процесс смешения жидкостей в проточном микроканале со смесителем Y-типа.

Исследование выполнено в тонком горизонтальном микроканале длиной $L = 7.0$ см, высотой $d = 0.2$ см и толщиной $h = 200$ мкм. В качестве рабочих жидкостей использованы водные растворы неорганических солей и гидроксидов щелочных металлов, которые обладают разными диффузионными свойствами. В работе исследована изначально неустойчиво стратифицированная по плотности система. Верхнее плечо Y-смесителя заполнялось более плотным раствором, нижнее – менее плотным. Визуализация возникающих в микроканале конвективных течений выполнена с помощью интерферометра Физо. Эксперименты выполнены для широкого диапазона управляющих параметров, в том числе скоростей течения v , отношений коэффициентов диффузии δ и перепадов плотностей $\Delta\rho$.

В докладе обсуждается структура возникающей конвекции и ее влияние на эффективность смешения жидкостей. Проводится сравнительный анализ с результатами, полученными ранее в задаче о смешении в условиях развития других гравитационных типов неустойчивости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии президента РФ для аспирантов и молодых ученых (СП-2408.2021.1)

Литература

- [1] Radko T. Double-Diffusive Convection Cambridge – UK: Cambridge University Press, 2013. – 344 p.
- [2] Bratsun D. A., Siraev R. R., Pismen L. M., Mosheva E. A., Shmyrov A. V., Mizev A. I. Mixing Enhancement By Gravity-dependent Convection in a Y-shaped Continuous-flow Microreactor // Microgravity Science and Technology. – 2022. – Vol. 34. – No 5. – P. 1-17.

КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СМЕШЕНИЯ В МИКРОКАНАЛАХ

Мошева Е.А., Мизёв А.И., Шмыров А.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mosheva@icmm.ru

В докладе представлены результаты экспериментального исследования возможности использования концентрационно-капиллярной конвекции Марангони для интенсификации процесса смешения жидкостей в проточном микроканале со смесителем Т-типа.

Эксперименты выполнены в микроканале длиной $l = 7.0$ см, высотой $h = 0.2$ см, толщиной $d = 0.02$ см (Рис. 1). С одной стороны канал оснащен микросмесителем Т-типа, через который реализован подвод жидкостей. Прокачивание производилось с постоянным контролируемым расходом с помощью двухканального инфузионного насоса. Через нижний входной канал микросмесителя подавалась более плотная вода, через верхний – менее плотный водный раствор изопропилового спирта. Выход прокаченной смеси осуществлялся на противоположном конце канала. Для возбуждения конвективного механизма смешения вблизи устья канала формировалась межфазная поверхность жидкость-газ путем помещения внутрь канала газового пузырька или ансамбля пузырьков. Варианты размещения межфазной поверхности, исследованные в работе, представлены на Рис. 1. Визуализация полей концентрации и структуры течения выполнена с помощью интерферометра Физо.

При контакте воды и водного раствора спирта между ними формируется относительно узкая переходная зона, смешение компонентов в которой происходит за счет диффузионных процессов. Спирт, будучи поверхностно-активным компонентом в смеси, уменьшает значение поверхностного натяжения раствора. В результате вдоль поверхности раздела жидкость-газ, граничащей с переходной зоной, возникает градиент поверхностного натяжения, что приводит к развитию концентрационно-капиллярной конвекции Марангони. Наличие конвективного массопереноса значительно ускоряет перемешивание исходных жидкостей по сравнению с чисто диффузионным смешением.

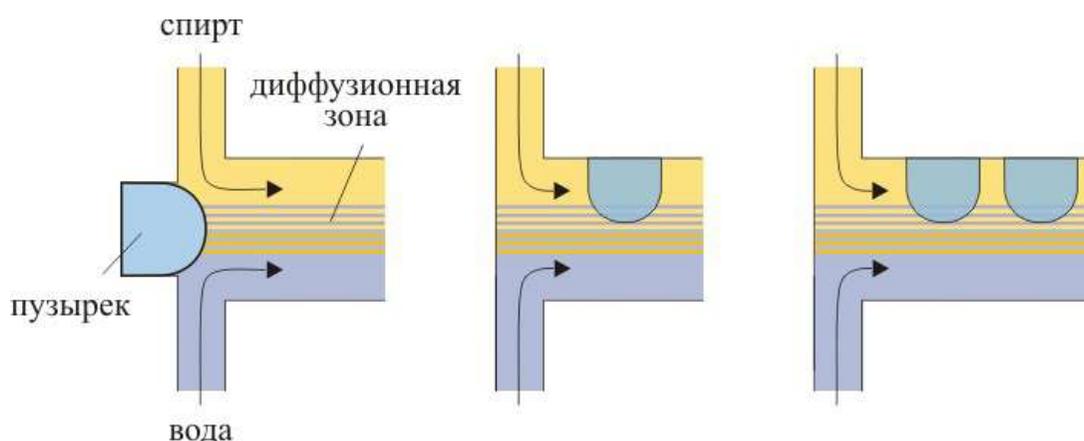


Рис. 1. Схема устья микроканала с различными вариантами расположения межфазной поверхности жидкость-газ, исследованными в работе.

В докладе обсуждается влияние расположения и геометрических параметров межфазной поверхности, а также свойств использованных жидкостей на эффективность смешения потоков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант 19-11-00133.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИНЫ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ УЧЕТЕ РАЗУПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
cem_mugatarov@mail.ru, wildemann@pstu.ru*

Проведено исследование закономерностей неупругого деформирования пластин с концентраторами напряжений различной геометрии на основе получения и анализа численных решений краевых задач механики закритического деформирования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью проведения уточненного прочностного анализа конструкций для обеспечения их прочности, надежности и безопасности.

Получены численные решения краевых задач закритического деформирования о растяжении пластин с концентраторами напряжений. Рассмотрены эллиптические концентраторы с различными углами наклона полуосей к направлению приложенной нагрузки, а также круглый, прямоугольный и ромбовидный концентраторы. В расчетах использована полученная экспериментально диаграмма деформирования стали 40Х. Построены эпюры напряжений, иллюстрирующие, каким образом реализуется полная диаграмма деформирования материала вблизи концентратора. Проведен анализ эволюции развития зоны разупрочнения. Построены расчетные диаграммы нагружения. Отмечено, что рост расчетной нагрузки может продолжаться даже после начала процесса закритического деформирования, аналогичные результаты получены в работах [1–4]. Определены дополнительные прочностные и деформационные резервы, выявляемые при учете разупрочнения материала. Отмечена связь реализуемых резервов с величиной концентрации напряжений, возникающей у вершины концентратора. Сделан вывод о целесообразности учета закритической деформирования при проведении уточненного прочностного анализа конструкций с концентраторами напряжений. Высказано предположение о рациональности рассмотрения задач моделирования процессов равновесного роста трещин с использованием основных положений механики закритического деформирования [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00765) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

- [1] Радченко В.П., Горбунов С.В. Метод решения краевой упругопластической задачи о растяжении полосы с концентраторами напряжений с учетом локальных областей пластического разупрочнения материала // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2014. – № 4 (37). – С. 98–110.
- [2] Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Мугатаров А.И. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 3. – С. 32–40.
- [3] Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И. Задача о кручении цилиндрического тела с учетом разупрочнения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 4. – С. 29–36.
- [4] Wildemann, V.E., Mugatarov, A.I., Tretyakov, M.P. The analytical and numerical solution of the problem of stretching a system of parallel elements with random strength characteristics taking into account the postcritical stage of deformation and rigidity of the loading system // Meccanica. – 2022. – Vol. 57. – I. 9. – pp. 2323–2335.
- [5] Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И. Моделирование процесса равновесного роста трещины в композитном образце с позиций механики закритического деформирования // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 26. – № 1. – С. 48–61.

ОПИСАНИЕ ДИАГРАММ УДАРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ КОРОТКОЙ БАЛКИ

Мугатаров А.И., Староверов О.А., Вильдеман В.Э.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
cem_mugatarov@mail.ru, cem_staroverov@mail.ru*

Рассматривается проблема математического описания закономерностей накопления повреждений вследствие удара в конструкционных композитах. Актуальность данной проблемы обусловлена необходимостью учета возможной деградации механических характеристик материала в условиях ударных воздействий при прочностных расчетах композитных конструкций.

Проведено экспериментальное изучение влияния предварительного ударного воздействия на статическую прочность и долговечность при трехточечном изгибе короткой балки. По аналогии с кривой усталостной чувствительности [1] построены диаграммы ударной чувствительности. Отмечено наличие четырех характерных стадий: низкой чувствительности к удару (удар слабо влияет на механические характеристики), инициации (предварительное воздействие приводит к резкому снижению прочности), стабилизации (с ростом энергии предварительного удара снижение свойств материала происходит постепенно), обострения (удар приводит к полной потере несущей способности).

Для математического описания диаграмм ударной чувствительности предложена модификация ранее разработанной авторами модели описания диаграмм усталостной чувствительности [2–4], предусматривающей использование интегральных функций распределения вероятности. Для определения границ характерных стадий используется производная функция поврежденности. Проведена обработка полученных экспериментальных данных. Продемонстрирована высокая описательная способность модели. Выявлено, что наиболее целесообразным является использование бета-распределения. Сделан вывод о рациональности и целесообразности использования предложенной модели описания диаграмм ударной чувствительности для прогнозирования прочности и долговечности композитных конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых МК-1545.2022.4.

Литература

- [1] Wil'deman V.E., Staroverov O.A., Lobanov D.S. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered GFRP composites after preliminary cyclic loadings // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Т. 54. – №. 3. – С. 313–320.
- [2] Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э., Староверов О.А. Описание кривых усталостной чувствительности и перехода к критическим состояниям полимерных композитов интегральными функциями распределения вероятности // *Сборник материалов XVI международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»*. – 2022. – С. 65.
- [3] Мугатаров А.И., Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Усталостная чувствительность и критические состояния конструкционных композитов // *Материалы XXXI Всероссийской школы-конференции "Математическое моделирование в естественных науках"*. – 2022. – С. 223–225.
- [4] O.A. Staroverov, A.I. Mugatarov, A.S. Yankin, V.E. Wildemann. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2023. – Vol. 17. – No. 63. – pp. 91–99.

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СНАРЯДА

Мугинов Р.Р., Пещеренко С.Н., Перминов А.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
muginov@mail.ru, peshcherenko@yandex.ru, perminov1973@mail.ru*

Диагностическую информацию о состоянии стенок газопроводов обычно получают путем их сканирования внутритрубным снарядом, приводимым в движение перекачиваемым газом. Считывание диагностической информации осуществляется через равные промежутки времени, поэтому скорость движения снаряда должна быть близка к постоянной. Это правило выполняется, если силы давления, действующие на снаряд, много больше сил сопротивления, создаваемых неоднородностями конструкции трубопроводов (сварными швами, вмятинами, изгибами и др.), например, в магистральных газопроводах, работающих при внутренних давлениях больше 3 МПа. Однако, за последнее десятилетие в РФ было построено более 7000 км газопроводов для попутного нефтяного газа, имеющих небольшие диаметры и низкое давление менее 1 МПа, в которых диагностические снаряды традиционной конструкции движутся неравномерно. Нами была предложена конструкция снаряда с центральным байпасным каналом регулируемого сечения, для управления скоростью его движения [1]. Целью предлагаемой работы стал выбор формы байпасного канала, препятствующей образованию отрывных течений, а также проверка гипотезы о возможности управления скоростью движения снаряда в газопроводе низкого давления за счет регулировки площади сечения байпаса.

Исследования проводились методами вычислительной механики на модели прототипа снаряда массой 600 кг. Газ считали сжимаемым и изотермическим. Вычисляли поля скоростей в байпасном канале и силы, действующие на снаряд при различных положениях заслонки в байпасном канале, а также динамику снаряда при прохождении им неоднородностей конструкции трубопровода, которые задавали как стопоры, мгновенно разрушающиеся при силе, превышающей варьруемое критическое значение.

Было показано, что центральный канал может быть выбран в форме сопла Лавалья с двумя дополнительными байпасными каналами, соединяющими входной участок центрального канала с его диффузорной частью. Вычислены силы, действующие на снаряд со стороны газа, протекающего через байпасный канал при различных положениях заслонки, регулирующей его сечение. Показано, что если прочность стопоров не превышает 15000 Н, то время стабилизации движения будет не более 1 сек.

Литература

[1] Пещеренко С.Н., Павлов Д.А., Пещеренко М.П., Перминов А.В., Мугинов Р.Р. Внутритрубный диагностический снаряд для газопроводов. – Патент РФ №27773700. 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА СТЭФ

Муллахметов М.Н., Лобанов Д.С., Янкин А.С., Мельникова В.А., Чеботарева Е.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
m.mullahmetov59@gmail.com, cem.lobanov@gmail.com, yas.cem@yandex.ru,
lerkaalekseevna508@mail.ru, chebotareva_rina@mail.ru

В ходе работы проведены исследования циклической долговечности стеклопластиков конструкционного назначения СТЭФ в условиях одноосного циклического нагружения. Целью работы является исследование влияния различных концентраторов напряжений на циклическую долговечность.

Для проведения экспериментов использовались образцы в виде полосок, а также образцы с V-образным концентратором разной конфигурации со скруглением в вершине выреза. Для обеспечения статистически пригодной выборки для каждого типа испытано не менее 5 образцов.

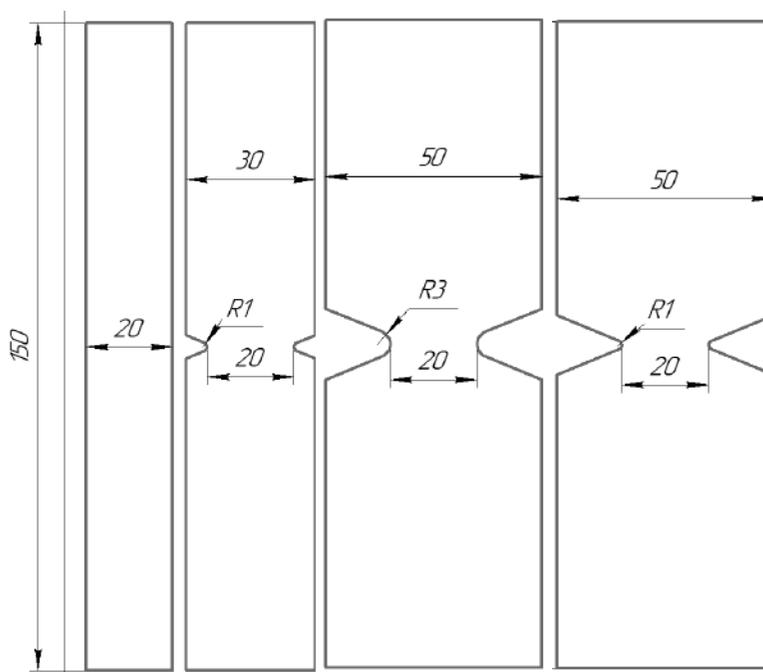


Рис.1 геометрия используемых образцов

Предварительно проведены установочные эксперименты в условиях одноосного растяжения с целью получения значения предела прочности для исследуемого материала. Подбор режима нагружения, при котором исследуемые образцы выходили на необходимое количество циклов наработки осуществлялся путем снижения максимального напряжения, реализуемого за цикл, с шагом 10% от значения предела прочности. Испытания на циклическую долговечность проводились при частоте 10 Гц и коэффициенте асимметрии цикла 0,1.

Все эксперименты проводились с использованием системы регистрации акустической эмиссии и видеосистемы контроля деформаций VIC-3D

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 21-79-10205, <https://rscf.ru/project/21-79-10205/>) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

КОВАРИАНТНО ПОСТОЯННЫЕ ТЕНЗОРЫ И ПСЕВДОТЕНЗОРЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФОРМАХ МИКРОПОЛЯРНОЙ МЕХАНИКИ

Мурашкин Е. В., Радаев Ю. Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

murashkin@ipmnet.ru, radayev@ipmnet.ru

В механике анизотропных микрополярных сред ковариантно постоянные тензоры и псевдотензоры играют первостепенную роль при выводе определяющих уравнений, поскольку их можно переносить через оператор ковариантного дифференцирования, что существенно упрощает дифференциальные уравнения механики и термомеханики. Вариационные уравнения, описывающие деформирование сплошных микрополярных сред, в общем случае также требуют привлечения формализма псевдотензорной алгебры и анализа. Особенно актуальными эти понятия становятся при моделировании процессов деформирования материалов, проявляющих полуизотропные (гемитропные, демитропные) свойства, определяющие тензоры и псевдотензоры которых обязаны быть чувствительными к зеркальным отражениям трехмерного пространства.

Настоящее исследование посвящено проблемам псевдотензорных формулировок гемитропной микрополярной связанной термоупругости (GN-I) первого типа.

Вывод линейных уравнений теплопроводности и динамических уравнений гемитропного микрополярного термоупругого GN-I континуума в псевдотензорной формулировке проводится на основе обобщенного термодинамического подхода. В качестве термодинамического базиса выбираются: энтропия (или температура), асимметричный тензор малых деформаций и псевдотензор изгиба кручения. Рассматриваются квадратичные энергетические формы внутренней энергии и свободной энергии Гельмгольца для анизотропного микрополярного термоупругого континуума GN-I. Энергетические формы ρg_{ij} предполагаются абсолютными инвариантами (в том числе, при зеркальных отражениях пространства). Анизотропные определяющие псевдотензоры для гемитропного тела включают: 3 псевдотензора четвертого ранга, 3 псевдотензора второго ранга и один абсолютный скаляр. Выделяется псевдотензорная часть с постоянными компонентами (по отношению к любым преобразованиям пространства). В результате применения специальных координатных представлений полуизотропных псевдотензоров четвертого ранга можно определить все 12 ковариантно постоянных определяющих псевдоскаляров, характеризующих гемитропный микрополярный термоупругий континуум GN-I. Полученные определяющие псевдоскаляры можно привести к конвенциональным, таким как модуль сдвига, коэффициент Пуассона, характерная микродлина (являющаяся псевдоскаляром отрицательного веса, чувствительным к отражениям трехмерного пространства), коэффициент линейного теплового расширения, коэффициент теплового искажения (w_{rnpess}), коэффициент теплопроводности, теплоемкость на единицу массы и псевдоскаляры, не имеющие физической размерности.

Предложенная трехмерная теория термомеханики гемитропного микрополярного термоупругого континуума первого типа допускает одно простое обобщение на случай многомерного Евклидова пространства, если микроповорот можно охарактеризовать одним (или несколькими) псевдовекторами.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда №~23-21-00262.

К ТЕОРИИ МАГНИТОИНДУЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРОМБИРОВАННЫХ КАНАЛАХ

Мусихин А. Ю., Зубарев А. Ю.

Уральский Федеральный университет, Екатеринбург.

Antoniusmagna@yandex.ru

Предлагается теоретическая модель и метод ее приближенного анализа для течений, индуцированных неоднородным магнитным полем в канале, заполненном немагнитной жидкостью и погруженной в него каплей феррожидкости. Исследование проведено в рамках разработки научного фундамента магнитоиндуцированной интенсификации транспорта лекарственных препаратов в тромбированных сосудах.

Для максимального упрощения математической задачи, в качестве модели кровеносного сосуда мы рассмотрим не цилиндрический канал, а полубесконечную плоскую щель, заполненную немагнитной ньютоновской жидкостью. Представленная модельная система изображена на рисунке 1. Правый конец щели закрыт непроницаемой для жидкости стенкой, моделирующей тромб; в щели недалеко от стенки находится облако растворимой феррожидкости.

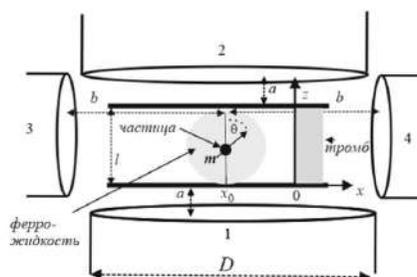


Рисунок 1 – Иллюстрация моделируемой системы

Уравнения для скорости \mathbf{v} течения намагничивающейся жидкости в неоднородном магнитном поле при малых числах Рейнольдса могут быть представлены в виде [1]):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \Delta v_x + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} (\Phi \Gamma) \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \Delta v_z - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\Phi \Gamma), \quad \frac{\partial}{\partial x} v_x + \frac{\partial}{\partial z} v_z = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Эта модель позволяет рассчитать магнитное поле внутри канала, создаваемого соленоидом, по закону Био-Савара-Лапласа. Используя наш метод решения уравнений феррогидродинамики [1], мы планируем рассчитать расход феррожидкости в зависимости от внешнего магнитного поля.

Литература

[1] Rosensweig R. E. Ferrohydrodynamics. – Cambridge University Press, 1985.

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ УПРУГИХ СРЕДАХ: ВЛИЯНИЕ СЛАГАЕМЫХ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА МАЛОСТИ

Мушанкова К.А.¹, Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара

karinamushankova@yandex.ru, stepanova.lv@ssau.ru

Композиционные материалы, горные породы и древесина являются примерами материалов, которые демонстрируют значительную анизотропию своих механических свойств, таких как модуль упругости, прочность и вязкость разрушения [1]. Эти материалы обладают широким спектром применений, включая авиационные композитные конструкции, миниатюрные медицинские протезы, усовершенствованные геотермальные системы, разработку сланцевых коллекторов методом гидроразрыва пласта, осадочные фундаменты, подверженные туннелированию, и деревянные сооружения. Дефекты и трещины играют важную роль в характеристике прочности и разрушения этих материалов. Следовательно, изучение трещин, имеющих в анизотропных средах, имеет решающее значение. В настоящем исследовании поле напряжений у вершины трещины описывается с помощью многочленного асимптотического разложения, обобщающего ряд Уильямса на случай ортотропных материалов [1]:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} &= 2\operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{i^{(k+1)^2}}{\mu_1 - \mu_2} r^{\frac{k}{2}-1} \begin{bmatrix} \mu_2^2 \mu_1^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} - \mu_1^2 \mu_2^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \\ \mu_1^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} - \mu_2^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \\ -\mu_2 \mu_1^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} + \mu_1 \mu_2^{((-1)^{k+1}+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \end{bmatrix} \right\} + \\ &+ 2\operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} B_k \frac{i^{(k+1)^2}}{\mu_1 - \mu_2} r^{\frac{k}{2}-1} \begin{bmatrix} \mu_2^2 \mu_1^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} - \mu_1^2 \mu_2^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \\ \mu_1^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} - \mu_2^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \\ -\mu_2 \mu_1^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} + \mu_1 \mu_2^{((-1)^k+1)/2} (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{\frac{k}{2}-1} \end{bmatrix} \right\}, \end{aligned}$$

где μ_1, μ_2 – пара сопряженных корней характеристического уравнения, A_k, B_k – коэффициенты слагаемых ряда. В работе исследовано влияние регулярных слагаемых на целостное описание поля напряжений у вершины трещины в случае ортотропных материалов (в частности, с кубической сингонией). Наличие точных аналитических решений задач о комбинированном нагружении ортотропной пластины с центральной трещины, полученных с помощью теории аналитических функций, позволяет сравнить точные решения и решение в рядах при удержании различного количества слагаемых. Установлено, что на чем больших расстояниях от кончика трещины описывается поле напряжений, тем больше слагаемых необходимо сохранять в ряде, представляющем поля вблизи кончика трещины. Неособые слагаемые играют существенную роль в представлении полей вблизи кончика трещины.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-11-00346).

Литература

[1] Nejati M., Ghouli S., Ayatollahi M. R. Crack tip asymptotic fields in anisotropic planes: Importance of higher order terms – Applied Mathematical Modelling. – 2021. – Vol. 91. – P. 837–862.

СРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО И ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Мушанкова К.А.¹, Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара

karinamushankova@yandex.ru, stepanova.lv@ssau.ru

В настоящее время большой интерес вызывает атомистический метод вычислений и атомистические модели в современной механике разрушения [1,2]. В этом отношении открытый код LAMMPS позволяет нам построить молекулярно-динамические модели различного вида образцов с дефектами. В данном исследовании рассматриваются конфигурации тел с трещинами, а именно, пластинка с центральной трещиной, изготовленная из гранецентрированной кубической меди. В ряде исследований [1,2] было показано, что угловые распределения, полученные методом молекулярной динамики, хорошо сочетаются с аналитическими решениями для изотропного линейно-упругого материала. Но так как рассматриваемый материал является анизотропным, естественно составить угловые распределения компонент тензора напряжений, полученные в рамках метода молекулярной динамики с решениями, учитывающими кристаллическую симметрию материала [3], что и составляет предмет данного исследования (рис. 1).

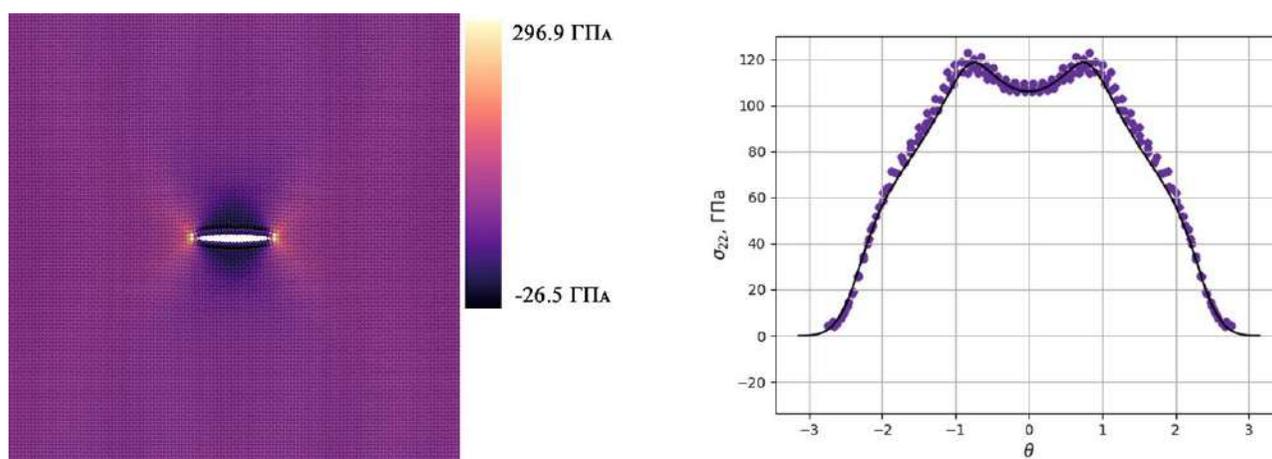


Рис. 1. Слева – распределение компоненты тензора напряжений σ_{22} , полученное в программном пакете OVITO на временном шаге 5 пс при приложении нормальной нагрузки; справа – график сопоставления аналитического и молекулярно-динамического решений для кольцевой области в окрестности вершины трещины

Поскольку оба подхода к нахождению полей напряжений анизотропных материалов находятся в достаточном соответствии друг с другом, можно сделать вывод об их применимости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-11-00346).

Литература

- [1] Stepanova L. V., Belova O. N. An Over-deterministic Method Based on Atomistic Stress Fields: Higher Order Terms of the Williams power expansion – *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – V. 39. – P. 748-760.
- [2] Mushankova K. A., Stepanova L. V. Atomistic determination of stress fields in samples with defects – *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2022 – Iss. 3 – P. 36–46.
- [3] Nejati Morteza, Ghouli Saeid, Ayatollahi Majid R. Crack tip asymptotic fields in anisotropic planes: Importance of higher order terms – *Applied Mathematical Modelling*. – 2021. – Vol. 91. – P. 837–862.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИЙ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ПРИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ПАТОЛОГИЯХ И В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Наймарк О.Б.,

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

naimark@icmm.ru

Установлено, что качественные изменения при трансформации нормальных клеток в раковые связаны с развитием конечно-амплитудных возмущений, ассоциируемых с мезоскопическими дефектами в молекуле ДНК (открытых состояний), зарождение и динамика которых определяет закономерности экспрессии генов как критического явления. Развитые представления, созданные оригинальные программные комплексы, были использованы для обоснования методов анализа данных лазерной микроскопии прижизненной динамики клеток и получения количественных характеристик нелинейной динамики, определяющих онкологические трансформации в клеточных структурах, влияние микрогравитации на фенотипы клеток.

Практическую ценность исследований представляют критерии дифференциации раковых и нормальных клеток, которые могут быть применены при разработке новых клинических методик с использованием данных лазерной микроскопии прижизненной динамики клеток и анализа патологических процессов на основе программных комплексов. Исследования явились составляющей программно-аппаратного комплекса, созданного на базе уникальной оригинальной российской разработки – лазерного интерференционного микроскопа МИМ-Н в рамках проекта ФЦП № 075-02-2018-147 «Разработка программно-аппаратного комплекса для ранней диагностики злокачественных опухолей и анализа эффективности действия противоопухолевых препаратов методами лазерной интерференционной микроскопии и инфракрасной термографии» (исполнитель ПФИЦ УрО РАН) совместно с индустриальным партнером (АО «ПО «УОМЗ им. Яламова», концерн «Швабе», ГК Ростех). Экспериментальные и теоретические результаты при анализе прижизненной динамики нормальных и раковых клеток, позволяют осуществлять сравнительный анализ данных лазерной микроскопии и флуоресцентного анализа.

Литература

- [1] Naimark O. B. et al. Mesoscopic Cell Mechanobiology and the Problem of Cancer // *Organisms. Journal of Biological Sciences.* – 2020. – Vol. 4, №. 1. – P. 42-56.
- [2] Naimark O. B. Structural-scaling transitions and localized distortion modes in the DNA double helix // *Physical Mesomechanics.* – 2007. – Vol. 1, №. 10. – P. 33-45.

РАСЩЕПЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ С МАЛЫМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ ФОРМЫ СРЕДИННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ОСЕВОЙ СИММЕТРИИ

Нарайкин О.С.^{1,2}, Сорокин Ф.Д.², Козубняк С.А.^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
sorokinfd@bmstu.ru, kozubnyak_sa@nrcki.ru

Конструктивные элементы типа упругих тонкостенных оболочек вращения широко применяются в различных технических устройствах и системах, оказывая, как правило, весьма значительное, иногда определяющее, влияние на их работу. В качестве примера можно привести оболочечные упругие чувствительные элементы широкого класса измерительных преобразователей механических величин (скорости, ускорения, силы, давления и т.д.) [1]. Широко известным прибором измерения угловой скорости указанного вида является волновой твердотельный гироскоп [1, 2].

Так как ни одна из существующих технологий изготовления таких элементов не обеспечивает точного соответствия параметров их геометрической формы номинальным проектным, большой интерес представляет анализ динамики тонкостенных оболочек, параметры геометрии которых имеют малые отклонения от идеальных, в первую очередь неосесимметричные, то есть зависящие от окружной координаты. Это связано с тем, что такого рода отклонения качественно изменяют динамические характеристики оболочки, вызывая эффект расщепления её спектра частот. Величина расщепления собственных частот неидеальной оболочки является одной из важнейших её динамических характеристик [1, 2].

На основе метода возмущений решается задача определения расщепления спектра частот упругой тонкостенной оболочки, геометрия которой слабо отличается от осевой симметрии. Разработаны математическая модель оболочечного упругого элемента, имеющего произвольные малые неосесимметричные погрешности параметров геометрии, и программно-алгоритмический комплекс численного расчёта расщепления его собственных частот. С помощью компьютерной аналитики построены возмущённые дифференциально-матричные операторы тонкостенной оболочки с произвольными малыми отклонениями от осевой симметрии формы срединной поверхности.

Так как возмущенная срединная поверхность оболочки не является поверхностью вращения, то вместо классических уравнений теории оболочек использован их тензорный аналог, который применим в произвольной системе гауссовых координат, в том числе косоугольной. Аппарат безиндексного тензорного исчисления (тензорная алгебра и тензорный анализ) реализован в форме библиотеки компьютерных процедур.

Приведены результаты расчётов расщепления собственных частот для конкретных оболочечных упругих элементов.

Литература

- [1] Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4. – С. 24 – 34.
- [2] Нарайкин О.С., Сорокин Ф.Д., Гуськов А.М., Козубняк С.А., Вахлярский Д.С. В Расчёт расщепления собственной частоты цилиндрического резонатора твердотельного волнового гироскопа на основе численного интегрирования высокой точности // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 5 (89). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-5-1876

КОЛЕБАНИЯ СТОЛБА ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТОЙ СКВАЖИНЕ И СООБЩАЮЩЕЙСЯ С ПЛАСТОМ

Насырова Д.А., Башмаков Р.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа
dinasyrova@mail.ru, Bashmakov Rustem@mail.ru

Ключевые слова: собственные колебания, собственные частоты, гидроудар, скважина, фильтрация жидкости, затухающие колебания, гидроразрыв пласта.

Рассмотрены собственные колебания столба жидкости в нефтяной скважине, возникающие при резком закрытии или открытии насосов скважины (гидроударе). Период колебаний, интенсивность затухания колебаний определяются протяженностью столба жидкости, ее реологическими свойствами, а также коллекторскими характеристиками призабойной зоны пласта (в частности, коэффициентами проницаемости, качеством перфорации скважины и свойствами образованных трещин ГРП). На основе математической модели, описывающей движение столба жидкости в скважине, когда ее верхний конец открыт, и фильтрацию в призабойной зоне, подверженной ГРП, получены решения задачи о собственных затухающих колебаниях столба жидкости в скважине. Построены графики зависимостей собственной частоты колебаний, коэффициента затухания, декремента затухания от проницаемости пласта при наличии и при отсутствии трещины ГРП. Изучены зависимости частоты и коэффициента затухания колебаний давления на различных участках скважины от значений проницаемости пласта, параметров ГРП. Показано, что акустическая диагностика основанная на анализе собственных колебаний в скважине может служить действенным инструментом для диагностики призабойной зоны скважины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>

Литература

- [1] Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 4 (362). – С. 5 – 14.
- [2] Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. К теории акустического сканирования повреждений подземных трубопроводов // Акустический журнал. – 2021. – Т. 67, № 6. – С. 1-12.

ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Некрасов О.О., Смородин Б.Л.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
dakeln2@gmail.com, bsmorodin@yandex.ru

В случае автономной инжекции с катода изучена конвекция неизотермической слабопроводящей жидкости, заполняющей горизонтальный конденсатор при нагреве сверху.

При решении задачи учитывалось влияние конвективного переноса заряда на поле в конденсаторе.

В случае постоянного поля рассмотрена линейная задача об устойчивости состояния механического равновесия, определены области монотонной и колебательной неустойчивости. Показано, что рост инжектируемого заряда S приводит к понижению порога возникновения колебательной конвекции и уменьшению частоты нейтральных колебаний ν_0 . Рост параметра $M \sim 1/K$, характеризующего подвижность заряда K , напротив повышает порог конвекции, но понижает частоту нейтральных колебаний ν_0 .

С помощью метода конечных разностей проанализированы устойчивые режимы стационарной конвекции и бегущих волн. Поскольку в надкритической по электрическому числу Релея T области фазовая скорость бегущей волны меняется незначительно [1], знание зависимости собственной частоты электроконвективной системы ν_0 от параметров задачи позволяет предсказать поведение течений в переменном поле.

В случае гармонической модуляции потенциала на одном из электродов изучены свойства двух типов устойчивых решений: модулированных бегущих волн (modulated traveling wave, MTW) и модулированной электроконвекции (МЕС). В зависимости от амплитуды α и частоты ν внешнего поля колебания характеристик конвективного течения относятся к одному из трех типов отклика: субгаммоническому, синхронному или квазипериодическому, а модулированные бегущие волны могут иметь сильную модуляцию либо только по амплитуде, либо и по амплитуде, и по фазе. Отметим, что в режиме бегущих волн отклонение заряда от его распределения в состоянии механического равновесия относительно мало. Зависимости от времени коэффициентов трех первых гармоник разложения функции тока в ряд Фурье в горизонтальном разрезе на середине высоты конденсатора показывают, что наибольший вклад в нелинейные колебания в модулированном поле дает первая пространственная гармоника.

При амплитудах модуляции поля выше некоторой критической, зависящей от частоты, режим MTW теряет устойчивость, и после переходного процесса формируется режим МЕС, синхронный с изменением внешнего поля. Для этого режима в распределении заряда в каждый момент времени ярко выражен пространственный ангармонизм.

Получена зависимость интенсивности конвективных течений от частоты при фиксированной амплитуде модуляции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00344, <https://rscf.ru/project/23-21-00344/>.

Литература

[1] Некрасов О.О., Смородин Б.Л. Электроконвекция слабопроводящей жидкости при униполярной инжекции и нагреве сверху // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 3. – С.116-132.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА

Нестеров С.А.¹, Бакланов В.Д.¹

¹Ивановский государственный энергетический университет, Иваново
elmash@em.ispu.ru

Магнитожидкостная герметизация вращающихся валов – это получившая наибольшее распространение сфера применения магнитных жидкостей (МЖ).

Трудность математического анализа физических процессов, протекающих в зазоре магнитожидкостного герметизатора (МЖГ), связана как с неньютоновским поведением МЖ, вязкость которой зависит не только от температуры и градиента скорости, но также и от величины магнитного поля, так и с обратным влиянием положения магнитной жидкости в пространстве на магнитную проводимость всего устройства [1].

Разработанная двухмерная осесимметричная модель рабочего зазора МЖГ состоит из стального вращающегося вала, заполненного МЖ зазора и неподвижного стального зубца, выступающего в роли концентратора магнитного поля.

Расчёт максимального удерживаемого герметизатором перепада давления проведён с использованием двух разных подходов к созданию модели. В первом случае принято допущение о полном заполнении магнитной жидкостью зазора между зубцом и валом. Во втором подходе в зазоре присутствует магнитожидкостная пробка, разделяющая воздушные области с высоким и низким давлением. В обоих подходах поверхность вала вращается с заданной угловой частотой. Второй подход дополнительно учитывает деформацию границы магнитожидкостной пробки под действием приложенного стороннего давления [2, 3].

Разработанные численные математические модели для взаимосвязанного расчёта магнитных и гидродинамических процессов в МЖГ позволяют оценить влияние центробежных усилий от вращающегося вала на удерживаемый МЖГ перепад давления.

Удерживаемый перепад давления, получаемый в результате расчёта по аналитическим формулам, на всём диапазоне частот вращения получается больше, чем при численном расчёте. Лучшее совпадение с аналитическим решением даёт численный расчёт с учётом деформации магнитожидкостной пробки под действием центробежной силы и приложенного перепада давлений. В этом случае разница в результатах не превышает 5% и связана с определением удерживаемого перепада давления при неподвижном вале.

Допущение о полном заполнении рабочего зазора магнитной жидкостью сильно занижает удерживаемый перепад давления при больших частотах вращения. Однако сильная экономия времени на создание и расчёт численной модели с данным допущением делает оправданным её использование при малых, до 10 м/с, линейных скоростях на поверхности вала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>

Литература

- [1] Казаков Ю.Б. Численное определение положения магнитной жидкости в магнитожидкостном герметизаторе // Электротехника. 2002. №1. С. 51-55.
- [2] Нестеров С.А., Егоров И.С. Анализ процессов в магнитожидкостном герметизаторе с учётом деформации магнитной жидкости // Вестник ИГЭУ. 2022. Вып. 1. Стр. 54-63. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.054-063
- [3] Nesterov S.A., Stradomsky Yu.I., Belov V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Sealer // Problems of the Regional Energetics. 2021. Vol. 3 (51). P.1-9. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.3-51.01.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ГЛАДКИХ ОБРАЗЦАХ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ КРУЧЕНИИ

Никитин А.Д., Никитин И.С.

*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва
nikitin_alex@bk.ru, i_nikitin@list.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования зарождения и роста усталостных трещин в двухфазном титановом сплаве при высокочастотном крутильном нагружении. Экспериментальные исследования выполнены на пьезоэлектрической установке [1]. Получены кривые усталости в области сверхмногоциклового усталости (СВМУ) и проанализированы поверхности излома. Показано, что усталостная трещина в области СВМУ при кручении может иметь очаг, расположенный как на поверхности, так и под поверхностью гладкого образца. Усталостная трещина зарождается в плоскости максимальных сдвиговых напряжений и ранний период роста ассоциирован со второй модой. При достижении некоторой длины трещины происходит смена механизма и пространственной ориентации макроскопической трещины. Дальнейший её рост наблюдается в плоскости максимальных нормальных напряжений. На этом этапе макроскопическая трещина ассоциирована с первой модой раскрытия – трещиной нормального отрыва. Были обнаружены трещины двух типов: Z – и X – трещины. В первом случае наблюдается одна макроскопическая трещина, находящаяся в плоскости максимальных нормальных напряжений, ориентированной под углом ~ 45 градусов к оси образца. Во втором случае наблюдается две трещины, расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях максимальных нормальных напряжений. Отмечена тенденция к формированию трещин X – типа в случае подповерхностного зарождения.

Для моделирования процесса усталостного разрушения была использована мультирежимная двухкритериальная модель [2] циклического разрушения на основе теории повреждаемости. Выбранная модель позволяет идентифицировать механизм (нормального отрыва или сдвига), по которому происходит достижение предельного состояния материала. Таким образом, в результате моделирования появляется возможность выделять участки роста усталостной трещины с различными механизмам раскрытия ее берегов. Объектом исследования были СВМУ образцы на кручение из двухфазного титанового сплава. Внешние нагрузки соответствуют экспериментальным. Результаты численного моделирования показывают качественное и количественное совпадение с результатами экспериментальных исследований. Для исследования случая подповерхностного зарождения в трехмерную модель образца «внедрялся» один более жесткий конечный элемент, имитирующий неоднородность микроструктуры. В результате также были получены качественные и количественные совпадения с экспериментальными данными. Была воспроизведена X – форма трещины при достаточном удалении очага зарождения от поверхности. Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-19-00705-П.

Литература

- [1] Nikitin A., Palin-Luc T., Bathias C. A new piezoelectric fatigue testing machine in pure torsion for ultra-sonic gigacycle fatigue tests: application to forged and extruded titanium alloys// FFEMS. – 2015. – Vol. 38, No 11. – P. 1294–1304.
- [2] Nikitin I.S., Nikitin A.D. Multi regime model and numerical algorithm for calculations on various types quasi crack developing under cyclic loading// Computer research and modeling. – 2022. – Vol. 14, No 4. – P. 871-883.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Никитин И.С., Никитин А.Д.

*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва
i_nikitin@list.ru, nikitin_alex@bk.ru*

В работе представлены результаты математического моделирования процессов зарождения и роста усталостных трещин в элементах авиационных конструкций, подверженных циклическому нагружению. Исследуются, в том числе, процессы комбинированного нагружения, когда наряду с полетными циклами на конструкцию могут воздействовать высокочастотные компоненты внешних нагрузок [1]. В частности, рассмотрено зарождение и развитие усталостной трещины в диске компрессора газотурбинного двигателя (ГТД Д30-КУ) при комбинированном воздействии полетных циклов нагружения (центробежные нагрузки) и наблюдаемых высокочастотных колебаний лопаток. Кроме того, высокочастотное нагружение может наблюдаться в быстровращающихся элементах конструкций. В качестве примера проанализирован случай разрушения ведомого конического зубчатого колеса центрального привода главного редуктора двигателя ПС90А в процессе эксплуатации. Для моделирования таких сложных режимов нагружения была использована мультирежимная модель усталостного разрушения на основе теории повреждаемости [2].

Показано, что уровень напряжений в эксплуатации может приводить к реализации процесса сверхмногоциклового усталостного разрушения (СВМУ). С помощью предложенной мультирежимной модели усталостного разрушения и реализованного алгоритма расчета функции повреждаемости удалось качественно и в известной мере количественно описать основные стадии зарождения и роста усталостных квазитрещин при контактном взаимодействии диска и лопаток 1 ступени компрессора газотурбинного двигателя в креплении “ласточкин хвост” и в быстровращающейся зубчатой передаче редуктора.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-19-00705-П.

Литература

- [1] Shanyavskiy A.A., Nikitin I.S., Nikitin A.D. The in-service fatigue fracture mechanisms for the I-stage low-pressure compressor disk of the aircraft engine D30KU-154// *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* – 2022. – P.1-14.
- [2] Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения // *Прикладная математика и механика.* – 2022. – Т. 86, Вып. 2. – С. 276-290.

ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

Никитин Н.В.

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
nvnikitin@mail.ru*

В работе сформулирован механизм, позволяющий объяснять, а в ряде случаев и предсказывать форму вторичных течений Прандтля второго рода, возникающих в турбулентных течениях в прямых трубах некруглого сечения с гладкими стенками [1-3]. Вторичные течения согласованы с распределением среднего давления по периметру поперечного сечения. На участке границы между соседними точками локального максимума и минимума давления частицы жидкости должны двигаться вдоль границы по направлению от большего давления к меньшему, поскольку напряжения Рейнольдса на твёрдой стенке отсутствуют, и сила давления может быть уравновешена только силой вязкого трения, действующей навстречу движению. В ряде случаев, расположение локальных экстремумов давления по периметру сечения трубы может быть установлено на основе анализа кривизны границы. Пульсационное движение по искривлённой траектории вдоль границы вызывает изменение давления на стенке тем большее, чем больше кривизна границы. На вогнутых участках границы возникает повышение давления, а на выпуклых, наоборот, возникает разряжение. Действенность предложенного принципа продемонстрирована на ряде известных из литературы примерах: течения в трубе квадратного сечения [4], в трубе эллиптического сечения [5], в трубах с сечением в виде кругового сектора с углами при вершине большими и меньшими 180 градусов, в прямоугольных трубах с закруглёнными углами [6], в эксцентрической кольцевой трубе [7]. В большинстве случаев примерную картину вторичных течений удаётся предсказать априори, пользуясь лишь соображениями симметрии и анализом кривизны границы поперечного сечения.

Условия сформулированного механизма нарушаются вблизи свободных границ, где кроме градиента давления на частицы жидкости действуют также касательные напряжения и результат их конкуренции заранее неизвестен. В работе приводятся результаты прямого численного моделирования турбулентных течений в прямоугольных каналах, содержащих свободные границы, демонстрирующие и объясняющие особенности вторичных течений в этих случаях.

Результаты данной работы дают рациональную основу для понимания причин формирования и предсказания формы вторичных течений Прандтля второго рода, возникающих в прямых трубах некруглого сечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-21-00184.

Литература

- [1] Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries // J. Fluid Mech. 2021. V. 917. A24.
- [2] Никитин Н.В., Попеленская Н.В., Stroh A. Вторичные течения Прандтля 2-го рода. Проблемы описания, предсказания, моделирования // Изв. РАН, МЖГ. 2021. №4. С. 1–27.
- [3] Nikitin N., Krasnopolsky V. Turbulent flows along a streamwise external corner // J. Fluid Mech. 2022. V. 940. A16
- [4] Никитин Н. В., Пиманов В.О., Попеленская Н.В. К вопросу об образовании вторичных течений Прандтля 2-ого рода // ДАН. 2019. Т. 484. № 4. С. 1–5.
- [5] Nikitin N., Yakhot A. Direct numerical simulation of turbulent flow in elliptical ducts // J. Fluid Mech. 2005. V. 532. P. 141–164.
- [6] Vidal A., Vinuesa R., Schlatter P., Nagib H.M. Turbulent rectangular ducts with minimum secondary flow // Int. J. Heat Fluid Flow. 2018. V. 72. P. 317–328.
- [7] Nikitin N., Wang H., Chernyshenko S. Turbulent flow and heat transfer in eccentric annulus // J. Fluid Mech. 2009. V. 638. P. 95–116.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЛЕТКИ ЭУКАРИОТ В РАМКАХ СТАТИСТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Никитюк А.С., Кошкина А.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
nas@icmm.ru, alena_k.k@mail.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Механические свойства клеток эукариот являются важными биофизическими маркерами онкологической патологии. В частности, существует большое количество прямых доказательств того, что опухолевые клетки являются более мягкими и менее вязкими по сравнению с клетками в норме. В настоящее время не существует модели, отражающей полную феноменологию механического отклика клетки эукариот. Макроскопические модели как правило описывают ту или иную особенность её механического поведения, при этом они не учитывают микроскопические первопричины такого поведения. Микроскопические модели позволяют учесть структурно-динамические свойства компонент клетки эукариот, но для описания макромеханического поведения они требуют больших вычислительных ресурсов. Целью исследования является применение статистико-термодинамической теории к разработке теоретического описания механического поведения клетки эукариот, учитывающего её структурные, термодинамические и релаксационные свойства. В работе обсуждаются ориентационные свойства цитоактинового скелета клетки эукариот и вводится, описывающий их, тензорный параметр порядка. Предложен вид свободной энергии пачек актиновых волокон. Ориентационно-вязкоупругое тело используется как модель представительного объема клетки эукариот. На основе первого и второго законов термодинамики, а также принципа Онсагера получены эволюционные уравнения для ориентационно-вязкоупругого тела. Также в работе предложено использовать непрерывный спектр вместо дискретного набора времен релаксации напряжений в клетке эукариот, что позволяет получить более корректные результаты моделирования для широкого диапазона времен. Установлено, что предлагаемая в работе модель позволяет описать двойной степенной закона вязкоупругой релаксации живых клеток, наблюдаемый в экспериментах по нагружению и выдержке живых клеток на атомно-силовом микроскопе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт № АААА-А19-119013090021-5), а также поддержана Грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (№ МК-44.2022.1.1).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЫВА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКИ ДВИЖЕНИЕМ РАСПЛАВА В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Никулин И.Л.¹, Демин В.А.^{1,2}, Никулина С.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
nil@pstu.ru, demin@psu.ru, nikulina.svetlana@mail.ru

В работе методами математического моделирования изучено влияние изменения напряжённости переменного магнитного поля на перестройку поля скорости проводящего расплава и на упруго напряжённые состояния тонкой плёнки на его поверхности. Обнаружено, что в зависимости от частоты магнитного поля в объеме расплава могут возникать различные переходные режимы при установлении поля скорости. Так, при низких частотах быстрое переключение напряжённости приводит к затухающим колебаниям в осредненном поле скорости, тогда как при умеренных значениях и в верхнем частотном диапазоне колебания практически отсутствуют. Такое «более упругое» поведение расплава в нижнем частотном диапазоне может объясняться различной глубиной проникновения силы Лоренца. При низких частотах она присутствует практически во всём объёме. Эта сила ускоряет расплав, движущийся со скоростью меньшей, чем средняя, и тормозит слишком разогнавшийся. При повышении частоты индукционные токи и сила Лоренца вытесняются к поверхности расплава, оставляя в середине диссипативное вязкое ядро, которое гасит колебания скорости, вызванные сменой напряжённости поля. Рассмотрены упруго напряжённые состояния плёнки, возникающие при постепенном нагружении её вязкими силами. Показано, что причиной первичного разрыва дискообразной плёнки всегда являются радиальные напряжения. Кольцеобразные плёнки, возникающие в результате либо разрыва в центре исходной плёнки, либо при отрыве от неё внешней части, оказываются неустойчивыми из-за больших азимутальных напряжений, которые значительно превышают прочность плёнки. Результат разрыва плёнки зависит от частоты магнитного поля, поскольку она определяет распределение силы Лоренца, и, следовательно, профиль течения металла на поверхности. В верхнем и нижнем частотных диапазонах течение на всей поверхности направлено от центра, поэтому, исходная плёнка будет сначала разорвана в центре радиальной деформацией, затем кольцеобразный остаток разорвётся азимутальными напряжениями; обрывки будут отнесены течением к краям. В центральном частотном диапазоне, где есть область направленных к центру течений, плёнка разрушается на два фрагмента. Первый дискообразный остаётся в центре, он стабилен, поскольку не слишком интенсивное течение слабо сжимает его и удерживает в центре поверхности. Второй кольцеобразный разрушается, и остатки разносятся, как это описано выше. Также, возможны ситуации, когда прочности плёнки оказывается достаточно, чтобы препятствовать интенсификации движения расплава при увеличении напряжённости поля, таким образом, тормозящее действие плёнки на расплав будет причиной её стабильности.

Литература

[1] И.Л. Никулин, А.В. Перминов, С.А. Никулина Влияние частоты и напряженности переменного магнитного поля на осреднённые течения металла // Пермские гидродинамические научные чтения: Сб. материалов V Всероссий. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова, 2018, Пермь: Perm University Press, С. 225-227

[2] Математическая модель деформирования оксидной плёнки на поверхности металлического расплава в переменном магнитном поле / И.Л. Никулин, В.А. Демин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2022, № 1, С. 72-88.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ГИГАЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

Оборин В.А., Соковиков М.А., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
oborin@icmm.ru

Экспериментально реализована программа испытаний по динамическому предварительному нагружению специально изготовленных образцов из сплава АМгб, ВТ-6 с последующей реализацией гигациклового нагружения (количество циклов 10^8 - 10^9), в условиях лабораторных экспериментов, максимально соответствующих распространенной в приложениях ситуации – катастрофическому уменьшению прочности элементов авиационных двигателей (лопаток вентиляторов) при случайном высокоскоростном соударении с твердыми частицами и последующем неконтролируемом традиционными методами снижении усталостного ресурса в условиях коррозионной среды. Гигацикловые режимы нагружения образцов с различной исходной поврежденностью реализованы на установке резонансного типа Shimadzu USF-2000 с частотой нагружения 20 кГц (коэффициент асимметрии $R=-1$) до стадии, соответствующей формированию очага макроскопической трещины и начала её распространения.

Обнаружено снижение на 15-25% предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава АМгб с уровня напряжения 162 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 121-138 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 7,5 \cdot 10^8$ при воздушном охлаждении образцов. Обнаружено снижение на 71% предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава ВТ-6 с 450 МПа до уровня 130 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 1,3 \cdot 10^8$. Отработана методика проведения экспериментов в условиях коррозионной среды на образцах из сплава АМгб, обнаружено снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава с 70 МПа в исходном (недеформированном) до уровня 50-60 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 4,2 \cdot 10^8$ при охлаждении образцов солевым туманом (3%NaCl).

Поверхностный рельеф разрушенных образцов исследовался методами фрактального анализа с помощью интерферометра-профилометра высокого разрешения New-View (при увеличении $\times 2000$) для определения характеристик коррелированного поведения многомасштабных дефектных структур, с которыми связывалось распространение трещины.

Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590009, теоретическая часть работы выполнена в рамках госзадания № АААА-А19-119013090021-5.

РАЗВИТИЕ ТОРСИОННОЙ МОДЫ ВИХРЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

Озерных В.С.¹, Голбрайх Е.², Лосев Г.Л.¹, Колесниченко И.В.¹

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Университет им. Бен Гуриона, Беер-Шева, Израиль*
ozernykh.v@icmm.ru

В работе рассматриваются два индуктора, которые создают разнонаправленное вращающееся магнитное поле в цилиндрической ячейке жидкого металла. Формирующееся вихревое течение металла при этом будет достаточно сложным. Формирование течения можно разбить на несколько стадий. К первой стадии, на которой сосредоточено внимание, относится разгон торсионной моды вихря. На этой стадии происходит существенное изменение угловой скорости, приводящее жидкость через неустановившийся режим к конечному состоянию [1]. Конечное состояние характеризуется относительно постоянной скоростью. Однако, следует отметить, что ее распределение может носить флуктуационный характер. Возникающее течение оказывается турбулентным. При этом турбулентность формируется во всем объеме за счет взаимодействия течений (а не формируется от стенок).

Расчеты проводились в рамках математической модели, основанной на уравнениях магнитной гидродинамики. Рассматриваются режимы, в которых магнитное число Рейнольдса меньше единицы — это означает, что процесс переноса магнитного поля потоком можно не учитывать и применять безындукционное приближение. Поэтому задачи электродинамики и гидродинамики изучались отдельно. Электродинамическая модель основана на уравнениях Максвелла. Модель реализована в программном пакете Ansys Emag с помощью метода конечных элементов. Гидродинамические исследования математической модели, основанной на уравнениях Навье-Стокса с использованием полуэмпирической модели турбулентности LES, проводились в программном пакете Ansys Fluent с помощью метода конечных объемов. Анализ корреляций пульсаций и перевод данных с электродинамической расчетной сетки на гидродинамическую проводился с помощью программы на языке Python. Эксперименты для верификации математической модели проводились на галлиевой эвтектике с применением ультразвукового доплеровского анемометра DOP 5000.

С помощью математического моделирования и эксперимента исследована начальная стадия разгона вихря. В результате получено, что разгон жидкости происходит быстрее вблизи стенки. Время разгона существенно определяется величиной электромагнитной силы. Для силы разной величины время разгона вихря может составлять от десятых секунды до нескольких секунд. В обоих случаях к этому времени происходит образование тороидальных вихрей, которые в дальнейшем становятся неустойчивыми из-за начинающегося взаимодействия течений верхнего и нижнего индукторов. Можно предположить, что образование этих вихрей означает окончание фазы разгона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/564 «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

[1] Harvey P. Greenspan. The Theory of Rotating Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, England, 1968.

ТЕЧЕНИЕ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ВБЛИЗИ ДВУХ СФЕРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ

Озерных В.С., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
ozernykh.v@icmm.ru*

В цилиндрическом объеме жидкости находится сферическая частица, электропроводность которой отличается от электропроводности жидкости. При пропускании электрического тока и коаксиального наложения внешнего магнитного поля в системе возникнет электромагнитная сила, локализованная вблизи частицы [1]. Интенсивность и направление силы определяется топологией растекания электрического тока, которая определяется искривлением линий тока вблизи частицы [2].

Математическая модель основана на безындукционном приближении, поскольку в моделируемых режимах магнитное число Рейнольдса меньше единицы. В связи с этим электродинамическая и гидродинамическая части задачи решаются отдельно друг от друга. Электродинамическая модель основана на уравнениях Максвелла, гидродинамическая модель основана на уравнениях Навье-Стокса. Построена математическая модель, позволяющая исследовать влияние электромагнитной силы как на одну, так и на несколько частиц в электропроводной жидкости.

Для одной зафиксированной частицы определена характерная структура вихря. Получено, что под действием электромагнитных сил возникают два азимутальных вихря, расположенных выше и ниже частицы. Эти вихри способствуют возникновению полоидального течения. Определена зависимость энергии в системе от времени. Процесс установления энергии завершается за время порядка нескольких секунд, дальнейшие колебания энергии не превышают 10%. Также энергия быстро растет при отклонении электропроводности частицы от электропроводности жидкости. Обнаружено, что течение генерирует сильные пульсации. Проведен Фурье-анализ флуктуаций скорости, который показал отсутствие выделенных частот колебаний, следовательно пульсации носят хаотический характер.

Определена зависимость возникающего вращающего момента электромагнитной силы в жидкости от расстояния между двумя сферическими частицами. Найдено критическое расстояние, при котором возникающие вихри вблизи частиц перестают взаимодействовать. Взаимодействие вихрей приводит к появлению сильных пульсаций скорости. Получено, что расположение двух частиц поперек направления тока приводит к возникновению большего момента силы, чем при продольном расположении. Построена зависимость величины электромагнитной силы от двух параметров: расстояние между частицами и угол между направлением тока и радиус-вектора между центрами частиц.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края №22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Shu D., Li T.-X., Sun B.-D., Zhou Y.-H., Wang J., Xu Z.-M. Numerical calculation of the electromagnetic expulsive force upon nonmetallic inclusions in an aluminum melt: Part I. Spherical particles // Metall. Mater. Trans. B. 2000. Vol. 31. P. 1527-1533. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0037-8>
- [2] Озерных В. С., Колесниченко И. В., Фрик П. Г. Течение в жидком металле под действием электромагнитных сил вблизи сферической частицы с отличающейся электропроводностью // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. - №15(3). - С. 354–362. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.3.27>

О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ РАСХОДОМЕТРИИ

Окатьев Р.С.^{1,2}, Фрик П.Г.^{1,2}, Гольбрайх Е.И.³, Колесниченко И.В.², Мамыкин А.Д.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

³*Университет им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль*

okatev.r@icmm.ru

Существуют различные способы измерения скорости течения и расхода жидких металлов. Один из таких способов основан на использовании методов корреляционного анализа [1-3]. Для его реализации необходимо провести измерения какой-либо характеристики течения (например, температуры) в двух точках. Для полученных сигналов строится кросс-корреляционная функция, максимум которой соответствует временному сдвигу между сигналами. По значению этого временного сдвига и расстоянию между точками измерения определяется скорость течения жидкости.

Оценка применимости метода корреляционной расходомерии требует детального исследования. Постановка экспериментов в случае работы с жидкими металлами осложняется их высокой температуропроводностью и химической агрессивностью. По этой причине становится необходимым использование методов вычислительной гидродинамики и математического моделирования.

Некоторые эффекты, приводящие к появлению погрешности корреляционного метода вне зависимости от точности измерений, оказывается возможным отследить даже на примере наиболее простых одномерных моделей. В первом приближении задача была сведена к решению уравнения переноса пассивной примеси с учетом диффузии. Постоянство скорости течения жидкости позволило свести исходную задачу к решению уравнения диффузии в терминах лагранжевых переменных. В качестве начальных условий задавались различные локализованные формы распределения примеси – дельта-функция, гауссиана и волновой пакет.

Погрешность метода определялась отношением скорости, найденной с использованием корреляционного анализа, к заданной скорости переноса. Показано, что при малых значениях коэффициента диффузии жидкости начальная форма сигнала практически не влияет на точность метода. Появление погрешности при больших значениях коэффициента диффузии объясняется развитием несимметрии формы сигнала. Эта несимметрия связана с тем, что после того, как одна часть возмущения уже прошла точку регистрации сигнала, другая продолжает искажаться за счет эффекта диффузии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

- [1] Belyaev, I., Razuvanov, N., Sviridov, V., and Zagorsky, V. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2017. – V. 55. – Pp. 37–43.
- [2] Pavlinov A., Khalilov R., Mamykin A., Kolesnichenko I. Electromagnetic flowmeter for wide-temperature range intensive liquid metal flows // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – V. 581. – Pp. 012011.
- [3] Kolesnichenko I., Mamykin A., Golbraikh E., Pavlinov A. Temperature correlation method application to the problem of measuring the flow rate of liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*. – 2021. – V. 57, No. 4. – Pp. 547-557.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА ТЕЧЕНИЕ ГАРТМАНА

Окатьев Р.С.^{1,2}, Фрик П.Г.^{1,2}, Колесниченко И.В.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
okatev.r@icmm.ru

Магнитное поле оказывает существенное воздействие на течение проводящих сред. Классическим примером изменения характеристик течения под действием магнитного поля стала задача Гартмана о течении проводящей жидкости между параллельными плоскостями, перпендикулярно которым наложено магнитное поле. Магнитное поле искажает профиль скорости таким образом, что ядро течения оказывается однородным, а все сдвиговые напряжения концентрируются в пограничных слоях, толщина которых уменьшается с увеличением поля. Другой важный эффект заключается в том, что наличие внешнего магнитного поля сдвигает порог устойчивости течения так, что течения жидких металлов в сильных магнитных полях оказывается устойчивыми даже при очень больших значениях числа Рейнольдса [1-3].

Тем не менее, существуют МГД-течения, в которых возникают пульсации скорости, значительно превосходящие те, что могли бы быть в отсутствие магнитного поля [4-5]. Зачастую развитие таких пульсаций связывается с появлением точек перегиба в профилях скорости.

В работе рассматривается течение, в котором появление точек перегиба в профиле скорости связано с наличием пространственной неоднородности свойств жидкости – вязкости и электропроводности. Постановка задачи аналогична постановке задачи Гартмана. Рассмотрены различные распределения неоднородности свойств. Исследовано влияние параметров распределения на профили скорости и интегральные характеристики течения. Исследована устойчивость полученных профилей скорости.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Брановер Г.Г., Цинобер А.Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред – М.: Наука, 1970. – 380 с.
- [2] Zikanov O., Krasnov D., Boeck T., Thess A., Rossi M. Laminar-turbulent transition in magnetohydrodynamic duct, pipe, and channel flows // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – V. 66, No. 3. – Pp. 030802.
- [3] Zikanov O., Belyaev I., Listratov Y., Frick P., Razuvanov N., Sviridov V. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // Applied Mechanics Reviews. – 2021. – V. 73, No. 1. – Pp. 010801
- [4] Melnikov I., Sviridov E., Sviridov V., Razuvanov N. Experimental investigation of mhd heat transfer in a vertical round tube affected by transverse magnetic field // Fusion Engineering and Design. – 2016. – V. 112. – Pp. 505–512.
- [5] Kirillov I., Obukhov D., Sviridov V., Razuvanov N., Belyaev I., Poddubnyi I., Kostichev P. Buoyancy effects in vertical rectangular duct with coplanar magnetic field and single sided heat load – downward and upward flow // Fusion Engineering and Design. – 2018. – V. 127. – Pp. 226–233.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЕКТРА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РАМКАХ МОДЕЛИ ПАРКЕРА

Окательев Р.С.^{1,2}, Фрик П.Г.^{1,2}, Соколов Д.Д.^{3,4}

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

³*Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва*

⁴*ИЗМИРАН, Москва, Троицк*

okatev.r@icmm.ru

Периодический характер активности Солнца хорошо известен. Наиболее ярким проявлением этой периодичности является 11-летний цикл солнечной активности. Физическим механизмом, обуславливающим появление цикла, служит возбуждение крупномасштабного возмущения магнитного поля, которое распространяется от умеренных широт к экватору.

Несмотря на существование выделенного периодического режима, наблюдаемый спектр солнечной активности является заполненным, причем структура его оставляет много вопросов как в части существования выделенных частот, так и в части распределения спектральной плотности энергии сплошной составляющей [1,2]. Как известно, сплошной спектр характерен для систем с хаотическим поведением. Для реализации механизма солнечного динамо, отвечающего за генерацию крупномасштабного магнитного поля, необходимо существование сложного турбулентного течения проводящей среды.

Турбулентная природа динамо-эффекта приводит к тому, что управляющие параметры процесса становятся недетерминированными. Вопрос о влиянии случайных флуктуаций параметров рассматривался ранее в контексте устойчивости основного цикла [3]. В данной работе влияние флуктуаций рассматривается с точки зрения спектральных свойств солнечной активности.

Моделирование проводится на основе модели динамо Паркера [4]. Уравнения модели решаются численно с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Пространственные производные аппроксимируются центральными разностями второго порядка. Варьируемыми величинами являются динамо число и время, в течение которого добавка к среднему значению динамо-числа остается постоянной (время памяти). Среднее значение времени памяти полагается равным основному периоду цикла.

Показано, что при физически реалистичных амплитудах флуктуаций спектр моделируемой солнечной активности остается квазидискретным. Непрерывная составляющая проявляется, когда амплитуда флуктуации превышает 50 процентов от среднего значения динамо-числа. При больших амплитудах флуктуаций появляется сплошной спектр активности, а баттерфляй-диаграмма становится нерегулярной.

Литература

- [1] Frick P., Sokoloff D., Stepanov R., Pipin V., Usoskin I. Spectral characteristic of mid-term quasi-periodicities in sunspots data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2020. V.491. P.5572-5578.
- [2] Sokoloff D. D., Frick P. G. Origin of the Continuous Component of the Variation in the Solar and Stellar Activity Spectra // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021, Vol. 61, No. 7, pp. 911–916.
- [3] Решетняк М.Ю. Нелинейность в модели динамо Паркера // *Геофизические исследования*. – 2014. – Т. 15, №2. – С. 15–28.
- [4] Parker E.N. Hydromagnetic dynamo models // *Astrophysical Journal*. – 1955. – V. 122. – Pp. 293–314.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНТАКТ ЖЕСТКОГО ШТАМПА С МЕМБРАНОЙ НА ПРОИЗВОЛЬНОМ ЭТАПЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Оконечников А.С.¹, Федотенков Г.В.^{1,2}, Феоктистова Е.С.¹

¹Московский авиационный институт, Москва

²НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
oas.mai@mail.ru, greghome@mail.ru, feoktistovaes@mai.ru

Согласно [1] при взаимодействии жёсткого ударника и мембраны характерно наличие двух этапов: сверхзвукового и дозвукового. Данная работа рассматривает оба этапа взаимодействия исследуемых тел.

Данная задача рассматривает взаимодействие ударника и мембраны начиная с момента касания исследуемых тел. Предполагается, что на начальном этапе взаимодействия скорость расширения области контакта превышает скорость звука. На данном этапе деформация мембраны невозможна за пределами области контакта, так как скорость распространения деформаций ниже скорости расширения области контакта взаимодействия исследуемых тел. С течением времени указанные скорости будут изменяться таким образом, что в определенный момент скорость расширения области контакта сравняется по величине с максимальной скоростью распространения возмущений в мембране. Начиная с этого момента времени деформации мембраны будут выходить за пределы области контакта, такой этап взаимодействия будет называться дозвуковым.

В рамках решения данной задачи был реализован численный алгоритм решения на ЭВМ для определения глубины погружения ударника и границ области контакта на сверхзвуковом этапе взаимодействия для ударника различной формы: цилиндрической, параболической и гиперболической. Также была построена программа численного интегрирования и получены результаты для параболического ударника на дозвуковом этапе.

Литература

[1] Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах // Учеб. Пособ.: Для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004 – 472 стр.

РАСЧЕТ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ

Ольховский Д.В., Бублик С.А.

Горный институт УрО РАН, Пермь
demexez@gmail.com, serega-bublik@mail.ru

В настоящее время многие горнодобывающие предприятия для поддержания и увеличения своих производственных мощностей вынуждены вовлекать в отработку все более глубокие залежи полезных ископаемых [1]. По мере увеличения глубины ведения горных работ температуры окружающих пород и воздуха в рабочих зонах шахт и рудников растут, при этом температура воздуха начинает превышать допустимые значения. Для решения данной проблемы все чаще возникает необходимость применения систем кондиционирования воздуха (СКВ), расчет которых в условиях рудника является сложной технической задачей. Для определения основных параметров СКВ для тупиковых выработок необходимо выбрать места установки воздухоохладителей, установить необходимость применения теплоизолированных вентиляционных трубопроводов и их толщину, а также мощность воздухоохладителей. Актуальной задачей на сегодняшний день является определение корректных параметров СКВ с учетом моделирования сопряженного тепломассопереноса в атмосфере тупиковой горной выработки, вентиляционном трубопроводе и окружающем породном массиве.

Работа посвящена описанию математической модели тепломассопереноса в этой системе, ее параметризации по данным натурного эксперимента и анализу влияния различных факторов на решение задачи. Процессы в атмосфере горной выработки рассматривались в одномерной постановке, а в породном массиве – в двухмерной осесимметричной постановке. В модели учитывался конвективно-диффузионный перенос теплоты в воздушной атмосфере, диффузионный процесс теплоты в породном массиве, теплоотдача на стенках трубопровода и горной выработки, а также лучистый теплообмен между внешней стенкой трубопровода и поверхностью выработки. Для учета проходки горной выработки во времени используется динамическая конечно-разностная сетка: происходит добавление новых пространственных узлов на вновь пройденных участках горной выработки, новых пространственных слоев в сетке породного массива.

Основными результатами работы являются рассчитанные распределения температур воздуха внутри вентиляционного трубопровода, выработки и температур породного массива на рассматриваемый период развития тупиковой выработки, которые позволяют определить технические параметры СКВ, необходимость применения теплоизолированных вентиляционных трубопроводов и их толщину.

Литература

[1] Kuyuk A.F., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hassani F.P. Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30, Issue 4. – P. 511-516.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХМАЛЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Омельянчик А.С.¹, Родионова В.В.¹

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград
asomeilyanchik@kantiana.ru, vyrodionova@kantiana.ru

В данной работе изучены структурные и магнитные свойства наночастиц оксидов железа, полученных соосаждением ионов железа в присутствии ингибиторов роста (лимонная кислота и глицин), которые обеспечивает контроль размера получаемых частиц [1,2]. Средний размер наночастиц менялся в диапазоне от ~2 нм до ~8 нм в зависимости от концентрации органических кислот. По фазовому составу частицы представляли смесь магнетита (Fe_3O_4) и маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). С уменьшением размера частиц наблюдалось снижение намагниченности насыщения от значения $84 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ для самых крупных наночастиц до $33 \text{ Ам}^2/\text{кг}$ для самых малых. Также с уменьшением размера наночастиц наблюдалось увеличение коэрцитивной силы с 32 мТл до 100 мТл . Сравнение размера частиц, оцененного по данным магнитных измерений, и размера частиц, измеренного методом просвечивающей электронной микроскопии, показало, что размер частиц, определенный из магнитных измерений примерно на 2 нм меньше физического. Предположительно, магнитная структура таких частиц – это магнитоупорядоченное ядро и магнитофрустрированная поверхность толщиной около 1 нм, которые действуют как две магнитные фазы, при этом толщина магнитофрустрированного слоя слабо зависит от размера самих частиц. Были проведены эксперименты, подтверждающие наличие эффекта магнитной памяти, типичного для систем типа спиновые или суперспиновые стекла. Дополнительное подтверждение того, что при низких температурах магнитофрустрированная поверхность действует как спиновое стекло и является активной магнитной фазой, было получено в ходе экспериментов, при которых образец охлаждался в сильном магнитном поле (3 Тл) до температуры 4,2 К, после чего измерялась полевая зависимость намагниченности. Смещение петли гистерезиса по оси x (поле обменного смещения ($\mu_0 H_{ob}$)) является подтверждением наличия двух магнитных фаз, взаимодействующих по механизму обменной связи. Такое смещение, как и специфичная форма температурных кривых намагниченностей, проявляется для магнитных наночастиц со средними размерами 2 и 4 нм. Принимая во внимание оцененный по магнитным измерениям размер частиц, можно предположить, что условие, при котором могут наблюдаться эффекты обменного смещения и магнитной памяти, – это соразмерность толщины магнитофрустрированной поверхности и магнитоупорядоченного ядра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-30032.

Литература

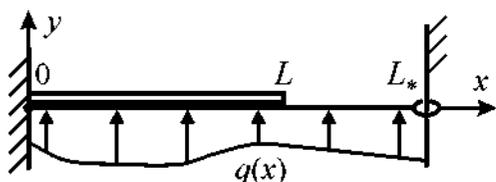
- [1] Omelyanchik, A., et al. "Effect of citric acid on the morpho-structural and magnetic properties of ultrasmall iron oxide nanoparticles." *Journal of Alloys and Compounds* 883 (2021): 160779.
- [2] Omelyanchik, A., et al. "Iron oxide nanoparticles synthesized by a glycine-modified coprecipitation method: Structure and magnetic properties." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 647 (2022): 129090.

ЗАДАЧА ОБ ОДНОСТОРОННЕМ КОНТАКТЕ СТРУНЫ И БАЛКИ

Осипенко М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
osipenko.michael@yandex.ru

Теория контакта одномерных объектов (струна и балка) мало разработана вследствие как объективных (математическая сложность), так и субъективных (недооценка значимости) препятствий. Наиболее (но далеко не достаточно) изучен контакт балок и контакт балки с твердым телом [1–5, 7–9]; в гораздо меньшей степени изучен контакт струн и струны с твердым телом [4, 6]. Задача о контакте струны и балки никогда даже не ставилась.



Рассмотрим односторонний контакт в системе, показанной на рисунке. В отсутствие нагрузки струна длины L_* и балка длины $L < L_*$ плотно прилегают друг к другу. T – натяжение струны, EJ – изгибная жесткость балки. Левый конец струны закреплен; левый конец балки защемлен; правые концы струны и балки свободны; $q(x)$ – нагрузка. Струна и балка слабо деформируются с возможным отставанием. Нужно найти контактную нагрузку $f(x)$.

Считаем, что $q(x)$ и $f(x)$ имеют вид [9] $p(x) + \sum_i P_i \delta(x - x_i)$, где $p(x) \geq 0$ – кусочно-непрерывна, $P_i \geq 0$. Условие контакта состоит, помимо неравенства $f(x) \geq 0$, в том, что $r(x) = y(x) - y_*(x)$ (расстояние между балкой $y(x)$ и струной $y_*(x)$) неотрицательно, а в тех точках, где $f(x) > 0$, – равно нулю: $f(x) > 0 \Rightarrow r(x) = 0$; $f(x) = 0 \Rightarrow r(x) \geq 0$. Математическая постановка задачи: найти $f(x)$ указанного вида, удовлетворяющую условию контакта.

Для такой постановки была доказана теорема единственности решения. Существование решения доказано построением аналитического выражения для него. Обозначим $k = \sqrt{T/(EJ)}$, $\Phi(\lambda) = \int_0^{L_*} q(s) ds - \int_0^\lambda \text{ch}(ks) q(s) ds$. Были доказаны следующие утверждения.

Если $\Phi(L) < 0$, то решение задачи имеет вид $f(x) = q(x) + k \int_x^\lambda \text{sh}(k(s-x)) q(s) ds$ при $0 \leq x \leq \lambda$; $f(x) = 0$ при $\lambda < x \leq L$, где $0 < \lambda < L$ – корень уравнения $\Phi(\lambda) = 0$. Если $\Phi(L) \geq 0$, то решение задачи имеет вид $f(x) = q(x) + k \Phi(L) \text{sh}(k(L-x)) / \text{ch}(kL) + k \int_x^L \text{sh}(k(s-x)) q(s) ds$.

Литература

- [1] Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов – М.: Наука, 1973. – 400 с.
- [2] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия – М.: Мир, 1989. – 510 с.
- [3] Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. A contact problem in the theory of leaf spring bending // Int. J. Solids Struct. – 2003. – № 40. – P. 3129–3136.
- [4] Осипенко М.А., Няшин Ю.И. Об одном подходе к решению некоторых одномерных контактных задач // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2011. – Т. 11, вып. 1. – С. 77–84.
- [5] Кузнецов С.А. Механика контактного взаимодействия – Казань: изд-во Казанского ун-та, 2014. – 72 с.
- [6] Осипенко М.А. Контактная задача для двух струн с переменными натяжениями // Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика. Механика. Физика”. – 2014. – Т. 6, № 3. – С. 66–71.
- [7] Kim J.H., Ahn Y.J., Jang Y.H., Barber J.R. Contact problems involving beams // Int. J. Solids Struct. – 2014. – № 51. – P. 4435–4439.
- [8] Belyaev A.K., Eliseev V.V., Irschik H., Oborin E.A. Static contact of belt and pulleys with account for shear and gravity // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – V. 1048, 012002, 9 p.
- [9] Осипенко М.А. Моментная контактная нагрузка при одностороннем контакте балок // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, вып. 1. – С. 69–81.

ЗАДАЧА АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ В МОДЕЛИ F СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Останин П.А.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
ostanin.pavel@phystech.edu

В работе рассматривается двумерная модель ионосферы Земли, включающая процессы амбиполярной диффузии и плазмохимии, а также система вариационной ассимиляции данных о полном электронном содержании (ПЭС). Сформулирована обобщённая постановка задачи в дифференциальной форме, для её решения получена система прямых и сопряжённых уравнений, предложен итерационный алгоритм решения (абсолютно устойчивые численные методы для решения прямой задачи, учитывающие специальный вид тензора диффузионных коэффициентов уравнения, подробно рассмотрены в работе [1]).

Основным уравнением модели является уравнение неразрывности для электронной плотности в F слое ионосферы без включения трёхмерного адвективного переноса и при стандартных приближениях относительно этой области (двумерная версия модели рассмотрена в [2]). Уравнение модели можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nabla(K\nabla(\cdot)) - \frac{\partial}{\partial z}(u \cdot (\cdot)) - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi}(v \cos \phi \cdot (\cdot)) + k \right) n = P_0 + U, \\ n|_{t=0} = n_0, \left(K_1^2 \frac{\partial n}{\partial z} - K_1 K_2 \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial n}{\partial \phi} - un \right) \Big|_{z=z_b, z=z_t} = 0, \end{array} \right.$$

где n – электронная концентрация, $K = \begin{pmatrix} K_1^2 & -K_1 K_2 \\ -K_1 K_2 & K_2^2 \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов диффузии, z – высота, ϕ – широта, t – время, P , k – функции фотоионизации и рекомбинации, U – управление, u и v – вертикальные и горизонтальные скорости. Задача рассматривается в тонком сферическом слое $\Omega = \{(z, \phi) \mid z_b \leq z \leq z_t, -90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ\}$.

В системе ассимиляции данных решается задача восстановления профилей по наблюдаемым ПЭС – набору интегралов от функции n вдоль прямолинейных траекторий: $\int_{\Omega_k} n(z, \phi, t) d\Omega = Tec_k(t), k = \overline{1, N}$. Для этого на множестве решений прямой задачи в итерационном процессе минимизируется регуляризованный по Тихонову функционал

$$J(U, n(U)) = \alpha \|U\|_{L_2(\Omega \times (0, T))}^2 + \|Cn(U) - \overline{Tec}\|_{L_2(\Omega \times (0, T))}^2$$

(здесь C – оператор наблюдений, а \overline{Tec} – вектор-функция с компонентами $Tec_k(t), k = \overline{1, N}$).

На основе контрольных экспериментов для стационарной и нестационарной постановок (дневное распределение и суточный ход) показано высокое качество восстановления решения для возмущений, скоррелированных с невозмущённым распределением.

Литература

- [1] Ostanin P. A. On the approximation of the diffusion operator in the ionosphere model with conserving the direction of geomagnetic field // RJNAMM. –2022. – V.37(1). – P. 25-39.
[2] Кулямин Д. В., Останин П. А., Дымников В. П. Моделирование F слоя земной ионосферы. Решение уравнений амбиполярной диффузии // Матем. Моделирование. – 2019. – Т. 31(4). – С. 57–74.

О ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЦИОНАЛЬНО ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Остапович К.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ostkirvad@gmail.com

Поликристаллические металлы и сплавы в процессах интенсивного неупругого деформирования испытывают существенные изменения своей мезо- и микромасштабной структуры, определяющей их физико-механические свойства на макроуровне. Способность управлять такой структурой с помощью соответствующих технологических операций дает возможность ставить задачи проектирования деталей и конструкций с наилучшими (для конкретных ситуаций) эксплуатационными характеристиками. Значительное влияние на физико-механические свойства поликристаллов оказывает распределение ориентаций решеток составляющих их анизотропных кристаллитов (зерен, субзерен, фрагментов). Создание неоднородностей в данном распределении (кристаллографической текстуры) способствует изменению различных макроскопических свойств, влияющих на качество функционирования проектируемого изделия. Таким образом, оказываются востребованными модели, физически адекватно воспроизводящие деформационное текстурообразование, а также взаимосвязь получаемых текстур с эффективными характеристиками. В этой связи описание процессов, реализующих интенсивное неупругое деформирование, предлагается осуществлять в рамках квазистатической геометрически нелинейной начально-краевой задачи с использованием в качестве определяющих соотношений двухуровневой статистической упруговязкопластической модели поликристаллического материала. Настоящая работа посвящена реализации на базе обозначенного подхода вычислительной методики для поиска режимов деформирования заготовки, обеспечивающих формирование в готовом изделии текстурных полей, рациональных с позиции его дальнейшей эксплуатации.

Сформулированная задача проектирования в общем случае представляется в виде системы связанных оптимизационных подзадач, для краткости обозначаемых T и F , относящихся к стадиям соответственно обработки (T) заготовки и функционирования (F) получаемого в результате изделия. Из решения подзадачи F устанавливаются значения параметров текстур в объеме изделия, отвечающие его наилучшим эксплуатационным характеристикам в заданных условиях. В подзадаче T , в свою очередь, осуществляется поиск значений переменных, управляющих деформированием заготовки, при которых в конфигурации изделия реализуются значения текстурных параметров, наиболее близкие к требуемым в подзадаче F . В рамках алгоритма, разработанного для решения поставленной задачи, моделируются опорные режимы, соответствующие некоторой выборке различных реализаций процесса с допустимыми управляющими переменными. Проведение данного этапа позволяет, во-первых, определить начальные приближения минимизирующих последовательностей для подзадачи T , а во-вторых – идентифицировать текстурные компоненты, характерные в рассматриваемом классе режимов. Информация о подобных компонентах, получаемая с привлечением специализированного аппарата кластерного анализа, используется для построения редуцированного базиса мер распределения ориентаций, порождающего текстурную параметризацию для решения подзадачи F .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596002.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОРОНАРНЫХ И ЭНДОБИЛИАРНЫХ СТЕНТОВ

Охотников А.О.¹, Ровойой Э.¹, Антонова О.В.¹, Охотников О.И.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Курский государственный медицинский университет, Курск

okhotnikov@compmechlab.ru, rovovoy99@gmail.com, antonova_ov@spbstu.ru,

oleg_okhotnikov@mail.ru

В данной работе были рассмотрены два типа медицинских стентов: биodeградируемые коронарные полимерные стенты из PLLA, нашедшие применение в стентировании коронарных артерий [1,2] и эндобилиарные стенты, используемые при стентировании стриктур желчного протока [3]. Первая часть исследования посвящена выбору и расчётному обоснованию применения реологических моделей материала стентов [4], позволяющих учитывать нелинейные эффекты при моделировании поведения стента. Исследования проводились для полимера PLLA и нитинола, обладающего свойством памяти формы [5].

Вторая часть работы направлена непосредственно на моделирование поведения стентов под действием различных нагрузок. Для эндобилиарных стентов наиболее критическим и поэтому представляющим интерес является циклическое воздействие, моделирующее перистальтическое воздействие двенадцатиперстной кишки. Для коронарных стентов в качестве одной из ключевых задач было выделено моделирование процесса раскрытия стента, а также варьирование геометрических параметров и оптимизация его конструкции.

Численное моделирование проводилось с использованием систем конечно-элементного анализа ANSYS и ABAQUS [6, 7].

Литература

- [1] Ming Li, Miaowen Jiang, Yuan Gao, Yufeng Zheng, Zhi Liu, Chen Zhou, Tao Huang, Xuenan Gu, Ang Li, Jiancheng Fang, Xunming Ji, Current status and outlook of biodegradable metals in neuroscience and their potential applications as cerebral vascular stent materials, *Bioactive Materials*, Volume 11, 2022, Pages 140-153
- [2] Wang L, Tong J, Dong P, Wilson DL, Bezerra HG, Gu L. Mechanical performance of PLLA stent. 2018 Des Med Devices Conf (2018). 2018 Apr;2018:V001T08A014
- [3] А.Г. Кучумов, Ю.И.Няшин, В.А.Самарцев, В.С.Туктамышев, В.А.Лохов, А.П.Шестаков. Математическое моделирование методики установки стента из материала с памятью формы при проведении эндобилиарных вмешательств. *Российский журнал биомеханики*. 2017. Т.21, No 4:461-472.
- [4] Nic Debusschere, Patrick Segers, Peter Dubruel, Benedict Verhegghe, Matthieu De Beule, A finite element strategy to investigate the free expansion behaviour of a biodegradable polymeric stent, *Journal of Biomechanics*, Volume 48, Issue 10, 2015, Pages 2012-2018
- [5] Nematzadeh F. A computational study on the effect of bending number on superelastic behavior of NiTi for medical application. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2020;31(18):2117-2127. doi:10.1177/1045389X20942568
- [6] ANSYS, Inc. Release Notes, Release 17 – SAS IP, Inc.
- [7] ABAQUS Analysis User's Guide, 2016

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Очиров А.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
otchirov@mail.ru

Волны на поверхности жидкости поражают разнообразием форм и структур. В исследовании [1] показано, что при распространении поверхностных волн вдоль свободной поверхности вязкой жидкости образуются тонкие высокоградиентные структуры – лигаменты. Влияние поверхностного электрического заряда на свободную поверхность исследовалось в контексте развития неустойчивости Тонкса-Френкеля [2] и в контексте влияния заряда на характеристики волнового движения, например, на величину массопереноса за счет дрейфовых движений [3]. В настоящем исследовании произведена попытка оценки влияния поверхностного электрического заряда на дисперсионные зависимости поверхностных волн и сопутствующих высокоградиентных течений.

Рассматривается распространение плоских бегущих волн $\zeta = \zeta(x, t)$ с частотой волнового движения ω вдоль свободной поверхности вязкой жидкости с кинематической вязкостью ν , плотностью ρ в прямоугольной декартовой системе координат Oxz , в которой ось Ox совпадает с равновесным положением свободной поверхности, а ось Oz направлена вертикально вверх против направления действия поля сил тяжести \mathbf{g} . Поверхностное натяжение характеризуется коэффициентом σ . Жидкость будем считать идеально проводящей – это позволяет считать, что электрический заряд сконцентрирован на поверхности с поверхностной плотностью \varkappa_0 . Ставится задача о расчете электрического потенциала Φ , функции тока ψ и дисперсионных зависимостей между компонентами волнового вектора и их связи с частотой. Задача решается методом разложения по малому параметру в приближении инфинитезимальных волн. Показано, что помимо регулярного волнового решения $k_z = k_x$ в задаче возникают сингулярные лигаментные решения $k_l = \sqrt{k_x^2 - i\omega/\nu}$. Получены дисперсионные соотношения, связывающие между собой компоненты волнового вектора k_x , $k_{z,l}$ и частоты ω . Показано, что поверхностный электрический заряд оказывает заметное влияние на дисперсионные соотношения в идеальной экспоненциально стратифицированной жидкости в области капиллярных волн и незначительное влияние в области гравитационных волн. Разработанная методика может быть применена для построения полных решений в присутствии поверхностного электрического заряда в том числе в вязких средах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

Литература

- [1] Chashechkin Y. D., Ochirov A. A. Periodic Waves and Ligaments on the Surface of a Viscous Exponentially Stratified Fluid in a Uniform Gravity Field // *Axioms*. – 2022. – Т. 11. – №. 8. – С. 402.
- [2] Григорьев А. И. и др. Капиллярные колебания и неустойчивость Тонкса-Френкеля слоя жидкости конечной толщины // *Журн. техн. физ.* – 1997. – Т. 67. – №. 8. – С. 27.
- [3] Belonozhko D. F., Ochirov A. A. On wave mass transfer along charged surface blown by dielectric medium // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – Т. 52. – №. 1. – С. 92-98.

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В РАВНОМЕРНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ НЕВЯЗКИХ ЖИДКОСТЯХ

Очиров А.А.¹, Лапшина К.Ю.²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

²Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

otchirov@mail.ru

История исследований волновых движений вдоль свободной поверхности жидкости насчитывает несколько столетий активных усилий экспериментаторов и теоретиков, однако до сих пор вопрос остается не до конца изученным. В частности, особый интерес представляет изучение распространения волнового движения вдоль свободной поверхности стратифицированной жидкости [1]. Ранее исследовалось влияние поверхностного электрического заряда на переносные свойства волн (см., например, [2]). Настоящая работа посвящена исследованию влияния поверхностного электрического заряда на характер распространения волн вдоль свободной поверхности идеальной экспоненциально стратифицированной жидкости с плотностью $\rho = \rho_{00} (\exp(-z/\Lambda) + s(x, z, t))$, характеризующейся масштабом стратификации $\Lambda = |d \ln \rho / dz|^{-1}$. Этот вопрос в настоящем исследовании не рассматривается. Задача решается в плоской постановке в прямоугольной декартовой системе координат Oxz , в которой ось Ox совпадает с равновесным положением свободной поверхности, а ось Oz направлена вертикально вверх против направления действия поля сил тяжести g . Поверхностное натяжение характеризуется коэффициентом σ . Считается, что вдоль свободной поверхности распространяется синусоидальная бегущая волна, которая вызывает отклонение поверхности от равновесного положения $\zeta(x, t)$. Жидкость считается идеально проводящей, поскольку время релаксации заряда существенно меньше характерных времен процессов, происходящих при волновом движении. Задача решается методом разложения по малому параметру в приближении инфинитезимальных волн. Получены дисперсионные соотношения, связывающие между собой компоненты волнового вектора k_x и k_z . Показано, что поверхностный электрический заряд оказывает заметное влияние на дисперсионные соотношения в идеальной экспоненциально стратифицированной жидкости в области капиллярных волн и незначительное влияние в области гравитационных волн. Разработанная методика может быть применена для построения полных решений в присутствии поверхностного электрического заряда в том числе в вязких средах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

Литература

- [1] Очиров, А. А., Чашечкин Ю.Д. Двумерные периодические волны в невязкой непрерывно стратифицированной жидкости // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 58. – № 5. – С. 524-533.
- [2] Belonozhko D. F., Ochirov A. A. On wave mass transfer along charged surface blown by dielectric medium // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2016. – Т. 52. – №. 1. – С. 92-98.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КОНВЕКЦИИ В СЖИМАЕМОМ ГАЗЕ

Палымский И.Б.

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск
palymsky@yandex.ru

В подавляющем числе работ по конвекции Релея-Бенара рассматривается течение несжимаемой жидкости на основе приближения Буссинеска [1]. Однако, расчет конвекции газа в областях высотой несколько десятков сантиметров и более требует учета его сжимаемости на основе полных уравнений газовой динамики. Подобные задачи возникают при рассмотрении течений углеводородо-воздушной смеси в резервуарах и трубопроводах.

Однако, конвекция в сжимаемом газе исследована плохо из-за большой жесткости системы уравнений обусловленной сосуществованием двух типов движения – распространяющихся со скоростью звука термоакустических волн и развивающегося на их фоне относительно медленного конвективного движения [1].

В настоящей работе путем численного моделирования исследуются характеристики устойчивости статического режима конвекции Рэлея-Бенара в сжимаемом, вязком и теплопроводном газе. Показано, что в зависимости от высоты области конвекции и величины температурного градиента реализуются различные режимы конвекции - изобарный, частным случаем которого является режим конвекции в приближении Буссинеска, адиабатический и сверхадиабатический. Причем, в адиабатическом режиме (узкая ножеобразная область на диаграмме) благодаря квазиадиабатическим процессам конвекция развивается даже при устойчивой по плотности стратификации! Ниже приведена диаграмма режимов конвекции на плоскости, где по осям отложены высота области и задаваемая разность температур. Черной сплошной линией и точками показаны соответствующие нейтральной кривой аналитические [1] и уточняющие их численные данные. Показано, что в воздухе при нормальных условиях смена режимов конвекции происходит при значении критической высоты области H_{cr} равной 17.3 см. Получены аналитические формулы для критической высоты H_{cr} в случаях малой вариации температуры и большой, с учетом температурной зависимости соответствующих коэффициентов, в обоих случаях исследованы соответствующие асимптотики. Режим конвекции газа, близкий к конвекции несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска наблюдается при высоте области между 1 и 10 см.

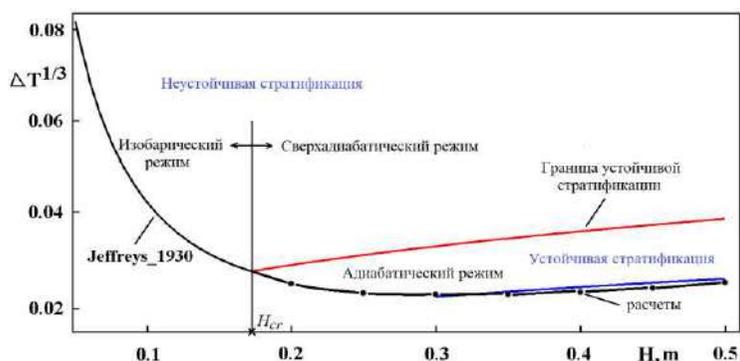


Диаграмма режимов конвекции сжимаемого газа

Литература

[1] Палымский И.Б. Об особенностях конвекции в сжимаемом газе. Труды международного конгресса Сиб-Оптика, Новосибирск, СГУГиТ, 19-21 мая, 2020. с.288-299.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО ПРОВОДНИКА НА ОСНОВЕ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОПРОВОЛОК

Панов Д.В.^{1,2}, Ковалец Н.П.², Волчков И.С.¹

¹ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

²Московский Педагогический Государственный Университет, Москва

dggamer@mail.ru

В настоящее время не ослабевает спрос на создание различных элементов гибкой электроники, таких как проводящие элементы, сенсоры и активные элементы [1-3]. Исследования в данных областях становятся все более востребованными, что обусловлено огромными возможностями применения элементов в отраслях микро- и нано-электроники.

Благодаря развитию методик синтеза наноматериалов становится возможным изготовление композитных проводников. Среди этих проводников выделяются методы изготовления, основывающиеся на интеграции металлических нанопроволок на поверхность или в объем полимерных пленок. Особенный интерес в этом ключе представляют нанопроволоки из Ag, Au, Pt.

Главными характеристиками таких гибких проводников становятся проектируемая проводимость, хорошая растяжимость, гибкость, механическая устойчивость и химическая стойкость. Для создания таких структур в работе был использован метод матричного синтеза. Высокая эластичность полимерного проводника обусловлена тем, что металлические НП занимают 5% или меньше, объема трековой мембраны [4].

В работе представлены результаты получения и характеристики массивов нанопроволок из Ag, выращенных при различных режимах. Методами растровой электронной микроскопии, энерго-дисперсионного анализа и рентгеноструктурного анализа была проведена характеристика структурных особенностей полученных образцов. Определено, что при росте методом матричного синтеза, относительно крупных образцов, наблюдается некоторая неравномерность в элементном составе полученных массивов и длине нанопроволок. Последующие исследования электрических и механических характеристик были выполнены измерением электрического сопротивления 4-х контактным методом Кельвина по всей поверхности образцов, а также на разрывной машине для получения значений механических характеристик образцов и предельной прочности на разрыв. Результаты эксперимента показывают разброс по поверхности образцов, коррелирующие с результатами характеристики. Области, отличающиеся наибольшей проводимостью и наилучшими механическими свойствами, имеют наиболее качественную структуру по серебру и наименьшее наличие паразитных примесей. Длины полученных наноструктур, в областях с наилучшими характеристиками, а также электрические характеристики показывают хорошую сходимость с выдвинутой ранее моделью расчета пересечений нанопроволок – электрические характеристики [5]. Все это позволяет получать массивы проводящих наноструктур с заданными значениями проводимости и механическими характеристиками.

Литература

- [1] Lee J., Lee P., Lee H., Lee D., Lee S. S., Ko S. H. Very long Ag nanowire synthesis and its application in a highly transparent, conductive and flexible metal electrode touch panel // *Nanoscale*. – 2012. – Т. 4, № 20. – С. 6408-14.
- [2] Ye S., Rathmell A. R., Chen Z., Stewart I. E., Wiley B. J. Metal nanowire networks: the next generation of transparent conductors // *Adv Mater*. – 2014. – Т. 26, № 39. – С. 6670-87. doi: 10.1002/adma.201402710.
- [3] Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D., Simonato J. P. Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: a review // *Nanotechnology*. – 2013. – Т. 24, № 45. – С. 452001
- [4] Mitrofanov A.V., Apel P.Y., Blonskaya I.V. et al. Diffraction filters based on polyimide and polyethylene (naphthalate) track membranes // *Tech. Phys.* – 2006. – V.51. – P.1229–1234.
- [5] Doludenko, I. M., et al. Electrical properties arrays of intersecting of nanowires obtained in the pores of track membranes // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – P. 126285.

ОРИЕНТАЦИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ХРУПКОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ПРИ ТРАДИЦИОННОМ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ

Пантелеев И.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
pia@icmm.ru

В работе представлено обобщение скалярной нелинейной реологической модели [1] на случай тензорного параметра поврежденности. Тензор поврежденности второго ранга вводится в рамках устоявшихся представлений континуальной механики поврежденности, главные значения которого описывают сокращение площади поперечного сечения материала в трех ортогональных направлениях. Разработанная модель в отличие от многих современных моделей деформирования и разрушения горных пород не требует соосности тензоров поврежденности, деформации и напряжения. Эта особенность открывает новые возможности для описания деформационного поведения трещиноватых сред при сложных криволинейных трехмерных траекториях нагружения и позволяет описать ориентационные эффекты при развитии поврежденности в поле приложенных напряжений.

Для случая одноосного сжатия материала с боковым подпором рассмотрены две характерные задачи: определение ориентации поврежденности (микротрещиноватости) во всем материале и определение ориентации зоны локализованной поврежденности, обеспечивающие максимальную скорость ее роста. Решение первой задачи с использованием разработанной модели позволило определить степень разориентировки исходной трещиноватости и скорости роста новой трещиноватости в зависимости от параметра анизотропии поврежденности. Показано, что максимальная разориентировка составляет до 18° , а в случае исходного ансамбля вертикальных или горизонтальных микротрещин ориентация новых микротрещин в точности совпадает с направлением минимального главного напряжения.

В результате решения второй задачи показано, что использование нелинейной реологической модели со скалярным параметром поврежденности позволило получить точное соответствие найденного оптимального угла наклона локализованной зоны поврежденности с углом Кулона-Мора. Использование тензорного параметра поврежденности позволило конкретизировать внутреннее строение зоны с позиции скорости диссипации энергии. Показано, что оптимальным углом наклона зоны локализованной поврежденности является угол, близкий к углу Кулона-Мора. Степень близости определяется уровнем анизотропии исходной поврежденности. При этом внутри зоны оптимальными являются две ориентации микротрещин: вертикальная ориентация трещиноватости, которая не зависит от степени анизотропии исходной поврежденности, ориентация относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом, близким к углу Кулона-Мора. Степень близости также определяется степенью анизотропии поврежденности в материале.

Литература

[1] Lyakhovsky V., Ben-Zion Y., Agnon A. Distributed damage, faulting, and friction // Journal of Geophysical Research. – 1997. – V.102, N.B12. – P. 27635-27649.

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПРИРОДА ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ПРИ ТРЕХОСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА

Пантелеев И. А.¹, Зайцев А. В.², Устинов К. Б.³, Мубассарова В. А.¹, Шевцов Н. И.³,
Химуля В. В.³, Карев В. И.³, Коваленко Ю. Ф.³

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

pia@icmm, a-zaitsev@mail.ru

Для описания механизмов и условий проявления эффекта памяти (эффекта Кайзера) в горных породах, подвергающихся трехмерному непропорциональному циклическому нагружению с изменением ориентации эллипсоида Ламе, проведены эксперименты с кубическими образцами из полимиктового песчаника на Испытательной системе трехосного независимого нагружения с непрерывной записью сигналов акустической эмиссии (АЭ) [1–5]. Результаты непропорционального трехосного сжатия по разработанной 9-ти цикловой программе нагружения показали, что преобладающим механизмом проявления эффекта памяти повреждений в каждом определенно ориентированном ансамбле трещин является развитие микротрещин нормального отрыва, ориентированных субнормально к направлению минимального главного напряжения [3–5]. Было обнаружено, что проявление эффекта Кайзера определяется не столько фактом раскрытия существующих "благоприятно" ориентированных микротрещин, сколько дискретным ростом существующих и появлением новых микротрещин. Полученные экспериментальные результаты могут рассматриваться в качестве триггера для развития моделей деформирования и разрушения горных пород, учитывающих анизотропную природу и ориентационные эффекты развития поврежденности при различных сложных напряженно-деформированных состояниях и реальных условиях трехосного непропорционального нагружения, которые наблюдаются в природных и антропогенных системах.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM–2020–0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг.

Литература

- [1] Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Зайцев А.В., Карев В.И., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 56–63.
- [2] Шевцов Н.И., Зайцев А.В., Пантелеев И.А., Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // Процессы в геосредах. – 2019. – №1(19). – С. 129–136.
- [3] Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Шевцов Н.И., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // ФТПРПИ. – 2020. – № 3. – С. 47–55.
- [4] Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эффект Кайзера при многоосном непропорциональном сжатии песчаника // Доклады РАН. Физика, Технические науки. – 2020. – Т. 495, № 1. – С. 63–67.
- [5] Пантелеев И.А., Зайцев А.В., Устинов К.Б., Мубассарова В.А., Шевцов Н.И., Химуля В.В., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Ориентационная природа эффекта деформационной памяти при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника // Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 293–310.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

Панфилов П.Е.^{1,2}, Коровин Р.В.¹, Меженов М.Е.^{1,2}, Кочанов А.Н.³, Зайцев Д.В.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

³ИПКОН РАН, Москва

peter.panfilov@urfu.ru

В докладе проводится сравнение механических свойств и разрушения некоторых горных пород (гранит, серпентинит, антрацит, песчаник) и минералов биологического происхождения (эмаль зубов человека, скорлупа птичьих яиц). Описание деформационного поведения модельных материалов получено по данным испытания малогабаритных лабораторных образцов. Образцы в форме дисков, вырезанные из модельных горных пород и эмали, испытывали по схемам одноосного сжатия и диаметрального сжатия (Бразильского теста) на воздухе и в воде. Образцы скорлупы, вырезанные в форме полосок, испытывали по схемам трехточечного изгиба и среза на воздухе и в воде. Трещины в образцах изучали при испытаниях по схеме диаметрального сжатия и изгиба. Показано, что при минимальном уровне растягивающих нагрузок (одноосное сжатие и срез) модельные материалы на макроскопическом масштабе демонстрируют вязкоупругое деформационное поведение, как на воздухе, так и в воде. В случае приложения к образцу растягивающих нагрузок, все модельные материалы вели себя хрупко на макроскопическом масштабе. При этом трещины, по росту которых можно получить информацию о деформационном поведении материала на микроскопическом масштабе, показывали вязкоупругое поведение. При диаметральном сжатии, образцы с трещинами не распадались на части, при остановке нагружения после перегиба машинной кривой «нагрузка-удлинение», а при изгибе трещины в скорлупе можно было подрастить, увеличивая стрелу прогиба. На основании полученных результатов было сделано заключение: (1) характер деформационного поведения модельных горных пород и биоминералов на макроскопическом уровне определяется долей растягивающих напряжений в схеме нагружения и меняется от хрупкого при изгибе и диаметральном сжатии до вязкоупругого при одноосном сжатии и срезе; (2) на микроскопическом масштабе, поведение модельных материалов было аттестовано как вязкоупругое при всех схемах нагружения; (3) влияние водной среды не приводит к качественным изменениям в деформационном поведении модельных материалов, независимо от происхождения. Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-29-00253).

ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ И ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАНОБАЛОК ЭЙЛЕРА-БЕРНУЛЛИ

Папкина И.В.¹, Крысько А.В.¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск
ikravzova@mail.ru, anton.krysko@gmail.com*

В работе построена математическая модель нелинейной динамики физически и геометрически нелинейных пористых функционально-градиентных балок Эйлера-Бернулли. Для построения математической модели приняты следующие гипотезы: 1. Кинематическая модель Эйлера-Бернулли. 2. Геометрическая нелинейность учитывается по модели Теодора фон Кармана, физическая - по деформационной теории пластичности. 3. Наноэффекты учитываются по модифицированной моментной теории упругости [1]. 4. Функционально-градиентная теория учитывает композитный материал, состоящий из двух фаз – керамической, которая считается упругой и металлической, которая считается физически нелинейной. Искомые уравнения получены, исходя из вариационного принципа Остроградского-Гамильтона. Уравнения в частных производных сводятся к задаче Коши методом конечных разностей по пространственным координатам второго порядка точности, которая решается методами типа Рунге-Кутты от 4-го до 8-го порядка и методом Ньюмарка. Для получения достоверных результатов исследуется сходимость разработанного алгоритма в зависимости от количества разбиваемых интервалов интегрирования в методе конечных разностей и указанных выше методов решения задачи Коши. На каждом временном шаге интегрирования построена итерационная процедура метода переменных параметров Биргера И.А. [2], доказательство сходимости которой сделано И.И. Воровичем и Ю.П. Красовским. Для получения стационарных задач используется метод установления [3]. Идея учета физической нелинейности для функционально-градиентных пористых структур впервые разработана в [4] Для задач нелинейной динамики (учет физической и геометрической нелинейностей) выявлены новые сценарии перехода колебаний из гармонических в хаотические, исследовано влияние нанопараметра на характер хаотических колебаний балок, распределение пор по толщине (однородная пористость, уменьшенная пористость от верхней и нижней поверхностей к центру, повышенная пористость на верхней и нижней поверхностях [5]), их размера и краевых условий.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда №22-11-00160, <https://rscf.ru/project/22-11-00160>

Литература

- [1] Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity.// International Journal of Solids and Structures. 2002, 39(10), pp. 2731 - 2743.
- [2] Birger, A. Some general methods of solution for problems in the theory of plasticity. Prikladnaya Matematika i Mekhanika. 1951, 25(6)
- [3] Krysko, V.A.; Komarov, S.A.; Awrejcewicz, J. Nonlinear deformations of spherical panels subjected to transversal load action. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2005, 194, 27-29, 3108-3126.
- [4] Krysko, A.V., Papkova, I.V., Rezhikov, A.F., Krysko, V.A. A New Mathematical Model of Functionally Graded Porous Euler–Bernoulli Nanoscaled Beams Taking into Account Some Types of Nonlinearities // Materials, 2022, 15(20), 7186
- [5] Fan F., Xu Y., Sahmani S., Safaei B. Modified couple stress based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally microplates using NURBS-based isogeometric approach. // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2020. . – pp. 372, 113400.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ НАНО ПЛАСТИН С ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Папкина И.В.¹, Яковлева Т.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов
ikravzova@mail.ru, yan-tan1987@mail.ru

В работе построена математическая модель функционально-градиентной пористой нано пластинки Кирхгофа с присоединенными массами. При построении математической модели были использованы следующие гипотезы: 1. Материал пластины - изотропный и упругий. Композит, построенный с помощью функционально-градиентной теории - керамики и металла; 2. Свойства керамики и металла зависят от температуры; 3. Пористость принята по теории, описанной в работе [1]; 4. Нанозффекты учитываются по модифицированной моментной теории упругости [2, 3]; 5. Присоединенная масса учитывается с помощью дельта-функции Дирака. Искомые дифференциальные уравнения получены, исходя из вариационного принципа Гамильтона. Построен алгоритм, который позволяет исследовать собственные колебания пластинки с присоединенной массой. Исследуется влияние на собственные колебания функционально-градиентной нанопластины с присоединенной массой в температурном поле размерно-зависимых параметров, краевых условий, типа температурного поля, соотношения толщины пластины к ее размеру в плане.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-71-10083, <https://rscf.ru/project/22-71-10083/>!

Литература

- [1] Fan F., Xu Y., Sahmani S., Safaei B. Modified couple stress based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally microplates using NURBS-based isogeometric approach. // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2020. . – pp. 372, 113400.
- [2] Lam D.C.C., Yang F., Chong A.C.M., Wang J., Tong P. Experiments and theory in strain gradient elasticity.// J. Mech. Phys. Sol. 2003, 51(8). – 1477–1508.
- [3] Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity.// International Journal of Solids and Structures. 2002, 39(10), pp. 2731 - 2743.

СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК УДЛИНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ РАЗНОЙ КРАТНОСТИ

Пегливанова М.М., Назарова Е.Д., Филин В.Ю.

НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»
peglivanovamm@yandex.ru, nazarova42@list.ru, npk3@crism.ru

Для получения характеристик прочности и пластичности судостроительных сталей в актуальных Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС) [1] предусмотрена возможность использовать образцы на растяжение разных типоразмеров. При этом в требованиях Регистра недостаточно аргументировано соответствие результатов испытаний, полученных на образцах разной кратности. В связи с этим была поставлена задача исследовать зависимость удлинения образца при разрушении от его кратности.

При решении этой задачи использовали метод конечных элементов (МКЭ) и верифицировали результаты расчетов по данным реальных испытаний. Рассматривали два принципиально важных вопроса:

1. Перевод экспериментальной диаграммы растяжения в «истинную» для использования при моделировании.
2. Проведение серии расчетов, моделирующих испытания материалов различной прочности на образцах разной кратности.

Экспериментальные диаграммы нагружения образцов при растяжении были переведены в «истинные» с использованием аналитических преобразований и численных расчетов для каждой исследованной марки стали. Полученные при моделировании диаграммы нагружения практически полностью совпали с исходными экспериментальными диаграммами. Ранее подобный анализ был проведен в работе [2], но разработанная нами процедура перевода диаграммы обеспечивает совпадение с экспериментальными данными в значительно большей степени. Помимо характерных точек – предел текучести, временное сопротивление, удлинение при разрушении, в наших модельных диаграммах хорошо отображены особенности участка текучести, а также нагрузка и сужение при разрыве.

Для решения второго вопроса моделировали образцы на растяжение различной кратности из материалов, для которых получены корректные «истинные» диаграммы. Результаты моделирования сравнивали с ожидаемыми значениями удлинения при разрыве по известным аналитическим формулам, по-разному учитывающим деформационное упрочнение. Выбрана формула, дающая более корректный результат. Сделаны предложения по корректировке Правил РМРС.

Литература

- [1] НД №2-020-101-152. Правила классификации и постройки морских судов РМРС. Часть XIII «Материалы», 2022г.
- [2] Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б., Есиев Т.С., Яковлев С.Е., Порошков А.В., Обыденнов Е.Н. Расчетно-экспериментальное исследование испытания падающим грузом высокопрочной трубной стали X100 (K80) // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. – Т. 83, № 3.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОТВЕРЖДАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

Пелевин А.Г.¹, Поморцева Т.Н.¹, Свистков А.Л.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²ИМСС УрО РАН, Пермь

Smile3k@ya.ru, tata.lisica@yandex.ru, Svistkov@icmm.ru

Важная роль в анализе особенностей работы препрегов в изделиях на околоземной орбите принадлежит вычислительному моделированию. Связано это с высокой стоимостью экспериментальных исследований механического поведения препрегов в условиях, близких к открытому космосу. Поэтому предварительную информация целесообразно получить в рамках вычислительного моделирования.

В работе предложено использовать многоуровневую модель поведения как отвержденных, так и неотвержденных препрегов. На первом уровне (микроуровень) определяются эффективные свойства нити с учетом свойств отдельных волокон, их количества в нити, расположения по отношению друг к другу. На следующем уровне (мезоуровень) учитывается структура ткани (особенности плетения, характерные размеры), механические свойства элементов ткани. Третий уровень (макроуровень) позволяет моделировать надувной элемент пневмокаркасных изделий из препрега со свойствами, полученными с помощью многоуровневого моделирования.

Разработанная модель нужна для вычислительного моделирования механического поведения надувных элементов каркаса конструкций, отверждаемых в космосе. В таких конструкциях роль опорных частей выполняет наполняемый воздухом каркас, который отверждается под воздействием высоких температур от солнечного излучения и излучения, идущего от Земли. Использование надувных трубчатых элементов позволит заменить металлические конструкции, уменьшив массу и объем в сложенном виде. Очень важно смоделировать поведение такого каркаса, чтобы при разворачивании и отверждении его на орбите он имел заданную геометрию, не появились складки и заломы. По мнению авторов, появление складок может привести к потере жесткости и устойчивости, как самого элемента, так и всей конструкции в целом. В данной работе многоуровневая модель использовалась для анализа механического поведения надувного элемента каркаса разной длины и при разных внутренних давлениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/1025.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОНВЕКЦИИ РЭЛЕЯ-БЕНАРА

Пермякова Э.В.^{1,2}, Голдобин Д.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
evelina.v.permyakova@gmail.com, denis.goldobin@gmail.com

Рассматривается проблема возбуждения тепловой конвекции в горизонтальном слое с изотермическими свободными границами при случайной модуляции силы тяжести. Для системы получены уравнения стохастической динамики амплитуды малых возмущений полей температуры и функции тока. Для этих уравнений выводятся условия роста среднеквадратичных значений, которые используются в качестве критерия возбуждения конвективных движений в системе. Возбуждение течений описано как для случая подогрева снизу, так и для подогрева сверху. Проверено, что найденные моды самого быстрого роста среднеквадратичных значений при всех значениях параметров лежат в области фазового пространства, имеющей физический смысл. В противоположность случаю высокочастотных периодических вибраций [1, 2] белый гауссов шум всегда оказывает дестабилизирующее воздействие на состояние механического равновесия [3, 4]. Случаи белого гауссового шума и гармонических высокочастотных вибраций также сопоставлены в общем виде, без привязки к частному виду уравнений тепловой конвекции.

Работы выполнены в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

Литература

- [1] Зеньковская С. М., Симоненко И. Б. О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1966. – № 5. – С. 51–55
- [2] Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Юрков Ю. С. О конвективной устойчивости при наличии периодически меняющегося параметра // Прикладная математика и механика. – 1970. – Т. 34. № 3. – С. 470–483.
- [3] Пермякова Э. В., Голдобин Д. С. Стохастическое параметрическое возбуждение конвекции Рэля-Бенара // Вестник Пермского университета. Физика. – 2022. – № 4. – С. 34–44.
- [4] Permyakova E. V., Goldobin D. S. Stochastic parametric excitation of convective heat transfer // Philosophical Transactions of Royal Society of London A. – 2023. – в печати. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0084>

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОСТИ НЕ ПОЛНОСТЬЮ ОТВЕРЖДЕННОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Пестренин В.М.¹, Пестренина И.В.¹, Кондюрин А.В.², Ландик Л.В.¹, Мерзляков А.Ф.¹, Поморцева Т.Н.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Эвингар Сайентифик, Эвингар

pestreninvm@mail.ru, ipestrenina@gmail.com, info@ewingarscientific.com.au,
lidialandik@gmail.com, merzlyakov@psu.ru, tata.lisica@yandex.ru

В технологических задачах изготовления оптических волокон, изделий из волоконных композитных материалов на основе эпоксидного связующего, а также в задачах механики развертывания и эксплуатации конструкций космического назначения [1] механикам приходится иметь дело с не полностью отвержденным полимером. Построение феноменологического кинетического уравнения конверсии полимера на основе изотермических экспериментальных данных рассматривается в публикации [2]. Данная работа посвящена построению физических уравнений не полностью отвержденного эпоксидного связующего в условиях изотермического нагружения при малых деформациях. Алгоритм построения состоит в следующем. Используются экспериментальные данные нагружения образца в два этапа. На первом этапе проводится его растяжение с постоянной скоростью до заданного значения деформации. На втором этапе образец релаксирует при фиксированной деформации в течение конечного времени. Анализ диаграммы $\sigma-\varepsilon$ позволяет заключить, что уравнениями состояния рассматриваемого образца предположительно являются уравнения линейной вязкоупругости в форме Вольтерра. При поиске материальных параметров таких уравнений принимается, что объемная деформация упруга, а ядро релаксации сдвига

аппроксимируется зависимостью $\Gamma(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{-\alpha_i t}$. Предлагается эффективный метод решения

такой задачи. Результаты ее решения, как видно из рисунка 1, вполне удовлетворительно описывает состояние рассматриваемого образца.

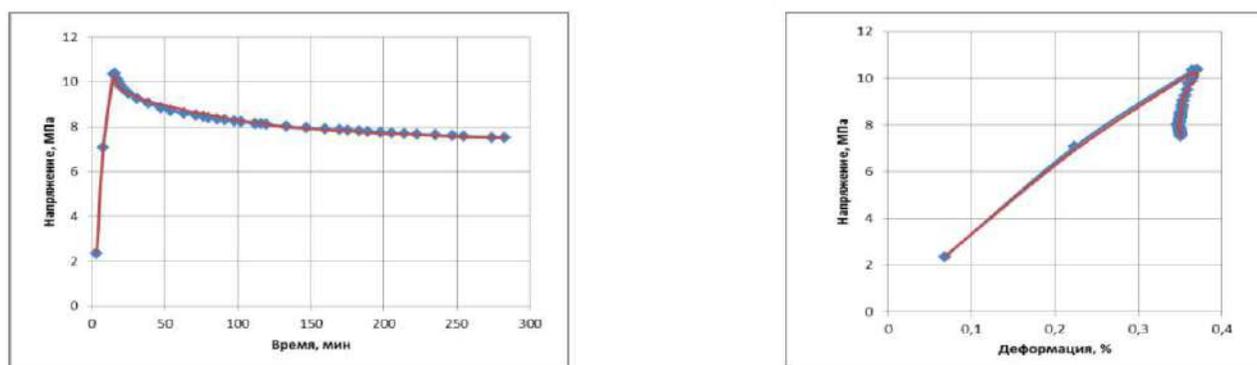


Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей: а – $\sigma(t)$; б – $\sigma-\varepsilon$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/1025.

Литература

- [1] Kondyurin A. Design and Fabrication of Large Polymer Constructions in Space. – Elsevier, 2022.–630 p.
- [2] Кондюрин А.В., Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В. Феноменологическое кинетическое уравнение конверсии связующего композиционных материалов на основе изотермических испытаний // Материалы конференции: «Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций» 10-12 октября 2022г., Пермь

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ СХЕМЫ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

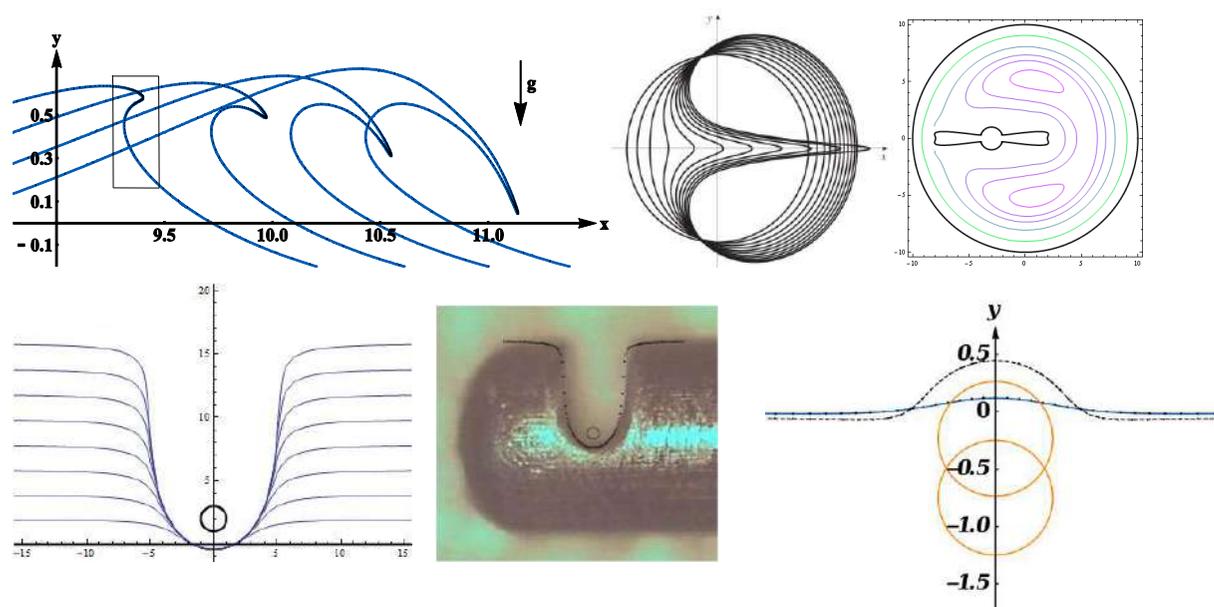
Петров А.Г.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

petrovipmech@gmail.com

Рассматривается класс краевых задач для гармонического и бигармонического уравнений в многосвязных двумерных областях. Задачи сводятся к решению линейных интегральных уравнений на граничных контурах, которые предполагаются гладкими. Представлен алгоритм вывода аппроксимации интегральных уравнений линейной системой с учетом логарифмических особенностей ядер интегральных операторов, через которые выражаются интегральные уравнения. В алгоритме используется периодичность функций, заданных на замкнутых граничных контурах. С ростом числа точек сетки погрешность аппроксимации убывает быстрее чем шаг сетки в любой фиксированной степени. Рассматриваются приложения к расчету течений идеальной и вязкой жидкостей, вызванных движением затопленных тел, задачи развития свободной поверхности.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-21-00833.



Литература

- [1] Петров А.Г. Алгоритм построения квадратурных формул с экспоненциальной сходимостью// Изв. ВУЗов. Математика. – 2021. – № 2. – С.86-92.
- [2] Kostikov V.K., Makarenko N.I. The motion of elliptic cylinder under free surface // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 722. – P. 012021.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ СУСПЕНЗИЙ ГЕТИТОВЫХ ЧАСТИЦ В ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

Петров Д.А., Чупеев И.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
petrovda@bk.ru, ilya.chupeev@mail.ru

В работе теоретически исследованы индуцированные магнитным полем ориентационные переходы в суспензии магнитных частиц на основе нематического жидкого кристалла (ЖК) – ферронематике. В роли примеси рассматривались частицы гетита, которые обладают собственным магнитным моментом, направленным вдоль длинной оси частицы, а также имеют отрицательную анизотропию магнитной восприимчивости [1]. Таким образом, в малых полях частицы гетита стремятся ориентироваться вдоль поля, а достаточно сильные поля ориентируют частицы перпендикулярно своему направлению. Наличие таких конкурирующих эффектов приводят к необычному фазовому поведению ферронематиков, включая возвратные ориентационные переходы, индуцированные внешним магнитным полем, а также повышение или понижение порога магнитного перехода Фредерикса по сравнению с беспримесным ЖК. Рассматривалась магнитокомпенсированная суспензий, в которой в отсутствие поля имеются равные доли магнитных частиц с магнитными моментами, направленным параллельно и антипараллельно директору ЖК (жидкокристаллический аналог антиферромагнетика) [2].

На основе термодинамического потенциала свободной энергии исследованы равновесные конфигурации полей директора ЖК и примесных частиц, возникающие под воздействием внешнего магнитного поля в геометрии поперечного и продольного изгибов. На примере оптической разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами света, проходящего через слой ферронематика, изучен магнитоориентационный отклик композита. Показано, что переход Фредерикса в ферронематике может происходить как в более высоких, так и более низких полях по сравнению с беспримесным ЖК. Получено представление свободной энергии ферронематика в форме разложения Ландау. Это позволило установить, что переход Фредерикса может происходить по типу фазового перехода как первого, так и второго рода в зависимости интенсивности сегрегационных эффектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Литература

- [1] Kopčanský P., Lackova V., Burylov S., Burylova N., Voroshilov A., Majorošová J, Agresti F., Zin V., Barison S., Jadżyn J., Tomašovičová N. The influence of goethite nanorods on structural transitions in liquid crystal 6CHBT // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 459. P. 26–32.
- [2] Burylov S., Petrov D. A., Lackova V., Zakutanská K., Burylova N., Voroshilov A., Skosar V., Agresti F., Kopčanský P., Tomašovičová N. Ferromagnetic and antiferromagnetic liquid crystal suspensions: Experiment and theory // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 321. Art. No. 114467.

ВЫБОР И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ НАПОЛНЕННОГО ФТОРКОМПОЗИТА ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ НА СВОБОДНОЕ И СТЕСНЕННОЕ СЖАТИЕ

Петухов Д.С., Адамов А.А., Келлер И.Э.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
petuhobds@mail.ru*

Наполненные композиты на основе политетрафторэтилена применяются в качестве антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом, поскольку имеют необходимое сочетание свойств, позволяющих работать при высоких контактных давлениях, возвратно-поступательном характере сдвиговых нагрузок и в широком диапазоне температур. Для моделирования механического поведения таких материалов в условиях эксплуатации требуются адекватные определяющие уравнения упруговязкопластичности и методы их идентификации по данным базовых экспериментов.

Тензорно-линейную модель упруговязкопластичности [1] предлагается идентифицировать по данным экспериментов на свободное сжатие образцов, подвергаемых циклу нагружения до максимальной деформации 10%, выдержки с последующей разгрузкой и аналогичному циклу нагружения до 160 МПа при стесненном сжатии. Данные испытания для композита на основе политетрафторэтилена, наполненного 40 масс. % мелкодисперсной бронзы, были проделаны при комнатной температуре, причем испытания на стесненное сжатие выполнялись для двух, а свободное сжатие — для трех значений скорости деформации в диапазоне $10^{-6} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Для описания этих данных рассматривались две модели упруговязкопластичности, представляющие собой модификации моделей Свейна и Ключковски и соответствующие соединению вязкоупругого либо упруго-нелинейновязкого элемента с пластическим или эндохронным элементами. В качестве вязкоупругого элемента рассматривался интегральный оператор с ядром Кольрауша.

Данные испытаний по стесненному сжатию позволили отщепить от определяющих соотношений упругую связь объемных деформаций и средних напряжений. Данные циклов свободного сжатия при различных скоростях деформации были использованы для определения материальных констант модели, для чего был реализован эффективный поисковый алгоритм на основе симплекс-метода минимизации невязки. Построенные модели обнаружили важность пластической (не зависящей от скорости деформации) составляющей для качественного описания циклического изменения напряжений, сопровождающего циклическое изменение деформаций, а также их зависимости от скорости деформаций. Обе модели упруговязкопластичности качественно правильно описывают поведение исследованного фторкомпозиата в условиях нагружения, близких к условиям эксплуатации антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом, и могут рассматриваться в качестве основы для их дальнейшего обобщения с учетом зависимости от температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596012.

Литература

[1] Петухов Д.С., Адамов А.А., Келлер И.Э. Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозиата по данным испытаний на свободное и стесненное сжатие // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т.22, № 3. – С. 180–192.

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Петухов Д.С., Келлер И.Э.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
petuhovds@mail.ru, kie@icmm.ru

Для повышения усталостной прочности деталей машин применяется поверхностная обработка (дробью, ультразвуком, лазерными импульсами, кавитационными микровзрывами, ионно-плазменным имплантированием, малопластическим выглаживанием и т.п.). Такая обработка создаёт приповерхностный слой тангенциальных положительных неупругих деформаций, которые из-за своей несовместности вызывают поле остаточных напряжений, сжимающих у поверхности и растягивающих в объёме детали. Для проектировки детали и выбора режима её поверхностной обработки необходимо уметь оценивать усталостную прочность в такой ситуации.

В докладе обсуждаются следующие 2 основные сложности при оценке усталостной прочности детали при наличии поля остаточных напряжений.

1) Даже в случае регулярного одноосного нагружения, наложение остаточных напряжений делает итоговую нагрузку многоосной и непропорциональной. Использование стандартных методов оценки усталостной прочности подсчётом циклов по диаграмме Вёлера в этом случае затруднительно. Необходимо иметь модель усталости, принципиально применимую в случае многоосного непропорционального нерегулярного нагружения. В качестве такой модели предлагается использовать значительно модифицированную, эволюционную модель Оттосена [1]. Несвязанная модель записывается для точки материала и ставит в соответствие истории изменения тензора напряжений, скалярную меру накопленной повреждённости.

2) Так как у поверхности возникновению и развитию трещин мешает интенсивное поле сжимающих остаточных напряжений, разрушение упрочнённых деталей может начинаться изнутри (fisheye failure). Закономерности такого разрушения иные (рис. 1), и для корректной оценки усталостной прочности необходим набор испытаний на образцах, подвергнутых поверхностной обработке.

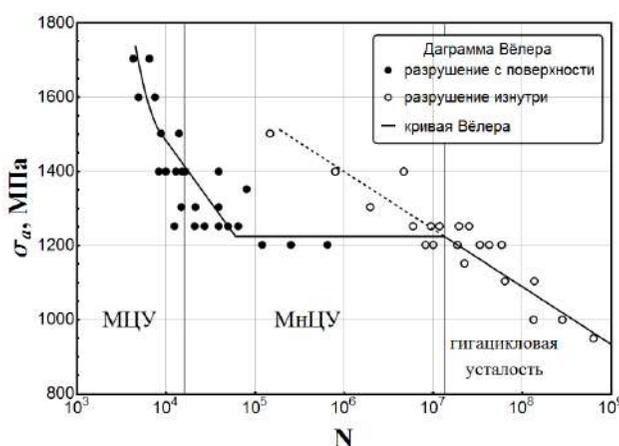


Рис. 1 Диаграмма Вёлера ($R=-1$) подшипниковой стали JIS SUJ2 [2].

Литература

- [1] Петухов Д.С., Келлер И.Э. Эволюционная модель усталостного разрушения при нерегулярном нагружении // Известия Российской Академии Наук. Механика твёрдого тела. – 2022. – № 2. – С. 72-81.
[2] Shiozawa K., Lu L., Ishihara S. S-N curve characteristics and subsurface crack initiation behaviour in ultra-long life fatigue of a high carbon-chromium bearing steel // Fat. Frac. Eng. Mat. Struct. – 2001. – Vol. 24. – P. 781-790.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ЗАПЯСТНОМ КАНАЛЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ КИСТИ С ПОМОЩЬЮ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пешин С.Е.¹, Кучумов А.Г.¹, Каракулова Ю.В.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский Государственный Медицинский университет, Пермь

sapeshin@yandex.ru, kuchymov@inbox.ru

Синдром запястного канала или карпальный туннельный синдром является наиболее распространенной патологией среди расстройств периферической нервной системы [1]. Пациенты, страдающие синдромом запястного канала, часто испытывают покалывание в кончиках пальцев, онемение кисти, боли при сгибательных и разгибательных движениях, что приводит к резкому ухудшению качества их жизни и потере работоспособности кисти. В таких случаях говорят о компрессии срединного нерва, который проходит через запястный канал и находится в окружении сухожилий сгибателей пальцев. Существующие на данный момент времени методики диагностики карпального туннельного синдрома не предоставляют информацию о давлении, оказываемом на срединный нерв, а также в научной литературе отсутствуют данные о влиянии движения сухожилий на компрессию срединного нерва. Данное исследование посвящено улучшению понимания синдрома запястья путем моделирования движений кисти и анализу влияния движения сухожилий сгибателей пальцев на компрессию срединного нерва с помощью метода конечных элементов.

Результаты магнитно-резонансной томографии здорового человека использовались для получения персональной геометрии костей кисти. Мягкие ткани запястного канала, а именно сухожилия, связки и соединительная ткань рассматривались как гиперупругий материал и их механическое поведение было описано моделью Огдена [2], а костные структуры рассматривались как упругие и были описаны моделью Гука [3]. Окончательная конечно-элементная модель состояла из 40 твердых тел, которые находились в контакт друг с другом и были соединены. Результаты были получены для четырех случаев движений запястья.

Компрессия срединного нерва находилась в пределах от 129 Па до 227 Па. Результаты показали, что пережатие срединного нерва происходит быстрее при сгибании запястья, чем при разгибании запястья или сгибании пальцев. Снижение компрессии во время сгибания пальцев было отмечено при разгибании запястья с последующим сгибанием пальцев. Также были получены результаты по перемещениям сухожилий внутри запястного канала во время движения кисти. Таким образом сделан шаг к разработке персонализированной методики определения величины компрессии срединного нерва [4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20067, <https://rscf.ru/project/22-21-20067> и при поддержке Министерства образования и науки Пермского края.

Литература

- [1] Яриков А.В., Туткин А.В., Бояршинов А.А. et al. Карпальный туннельный синдром: клиника, диагностика и современные подходы к лечению (краткий обзор) // Медицинский альманах. – 2020. – Т. 3(64). – С. 27–35.
- [2] Ogden R., Non-linear elastic deformations // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 1984. – V. 1(2).
- [3] Pistoia W., Van Rietbergen B., Lochmüller E.M., Lill C.A., Eckstein F., Rügsegger P. Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images // Bone. – 2002. – 30(6).
- [4] Peshin S.E., Karakulova J.V., Kuchumov A.G. Finite Element Modeling of the Fingers and Wrist Flexion/Extension Effect on Median Nerve Compression // Applied Sciences (Подана)

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕФТЯНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Пещеренко С.Н., Башкиров А.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
peshcherenko@yandex.ru; deusrivero@gmail.com

За примерно вековой опыт серийного применения нефтяных насосов была сформулирована концепция их конструкции, которую обычно задают несколькими десятками геометрических размеров. Для оптимизации насосов эти параметры необходимо варьировать, хотя бы на 5-7 уровнях, что дает гигантское число вариантов ($\sim 10^{15}$). А чтобы выбрать лучший, нужно, средствами CFD, вычислить и сравнить рабочие характеристики всех вариантов, что невозможно. Поэтому оптимальная конструкция не найдена и регулярно разрабатываются новые насосы и регулярно перестраивается производство под их изготовление. Обычно, новые насосы отличаются от имеющихся только другим сочетанием конструктивных параметров. Чтобы снизить затраты и окончательно найти лучшие конструкции насосов предлагается: найти минимальное и достаточное число параметров их конструкции, разработать методику CFD расчета рабочих характеристик насосов, предложить план оптимизационного вычислительного эксперимента и способ его реализации. В качестве примера взяли нефтяные центробежные насосы, изготавливаемые методом порошковой металлургии: ЭЦН3-90, ЭЦН5-125, ЭЦН5-140, ЭЦН5А-225, ЭЦН7А-300 и ЭЦН7А-500.

При параметризации конструкции насоса считали, что достаточно задать геометрические размеры проточной части. Каналы проточной части ограничены плоскими стенками в осевом направлении и криволинейными поверхностями лопастей в азимутальном. Для их описания задавали диаметры и ширины каналов, а также углы наклона лопастей на входе и выходе, для чего потребовались 9 размеров рабочего колеса и 9 направляющего аппарата. Для проверки достаточности такого выбора параметров, строили по ним 3D модель проточной части, проводили CFD расчет и его результаты сравнивали с экспериментальными данными.

Расчет проводили в Ansys CFX на структурированных гексагональных сетках в стационарной постановке, задавая массовый поток на выходе из расчетной области и открытую границу на входе. Использовали $k - \epsilon$ или SST модели турбулентности. Во всем диапазоне подач и для всех ступеней ошибка вычисления напора не превышала ошибки воспроизводимости при стендовых испытаниях, что подтвердило достаточность выбора геометрических параметров ступеней.

При оптимизации использовали композиционные планы Бокса-Уилсона, а в качестве центра плана – размеры серийной ступени, что позволило предположить, что глобальный оптимум находится внутри факторного пространства варьируемых параметров и выбрать в качестве аппроксимирующей функции полином второго порядка. Расчеты проводили в пакетном режиме. На первом этапе оптимизации расчетная область включала только рабочее колесо, на втором – направляющий аппарат и оптимизированное на первом этапе рабочее колесо. В качестве примера приведен расчет ступени ЭЦН2-28.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАСШТАБИРОВАННЫХ НЕФТЯНЫХ НАСОСОВ

Пещеренко С.Н., Башкиров А.С., Козлов И.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
peshcherenko@yandex.ru, deusrivero@gmail.com, darksiders0@yandex.ru

Улучшения рабочих характеристик центробежных нефтяных насосов можно получить путем варьирования геометрических размеров ступеней или путем масштабирования известных удачных ступеней на нужный габарит. Последний прием менее затратный, если имеется достаточно широкая база данных удачных ступеней. На практике этот прием обеспечивает напорно-расходные характеристики масштабированных ступеней близкие к получаемым пересчетом с характеристик исходных ступеней по критериям подобия. Однако КПД масштабированных ступеней, получаемых пересчетом с больших габаритов на меньшие габариты, всегда меньше, чем исходных. Причиной этого явления может быть влияние шероховатости проточных каналов, утечки и дисковое трение. Целью данной работы стала количественная оценка влияния перечисленных факторов на КПД масштабированных ступеней и поиск физического процесса, который позволил бы уменьшить, а, возможно, и компенсировать, потерю КПД при таком масштабировании.

В качестве исходной ступени взяли ЭЦН7А-500 и спроектировали геометрически подобные ступени в 3, 5 и 5А габаритах: ЭЦН3-90, ЭЦН5-140, ЭЦН5А-200. Напор и гидравлический КПД, во всем диапазоне подач, рассчитывали методами CFD в ANSYS CFX и сопоставляли с экспериментальными данными. Использовали гексаэдрическую структурированную сетку и SST модель турбулентности. Расчеты проводили как в стационарной, так и нестационарной постановке. В расчетную область, как это принято в гидромашиностроении, включали только проточные каналы ступеней, поэтому утечки жидкости и дисковое трение учитывали по полуэмпирическим зависимостям.

Было показано, что вычисленное значение напора совпадает с экспериментальными данными во всем диапазоне подач. Вычисленный гидравлический КПД у всех масштабированных ступеней примерно одинаков (что является следствием инвариантности уравнений гидродинамики относительно масштабных преобразований) и меньше полного КПД, измеренного в стендовых условиях. Влияние дискового трения на КПД было слабым, шероховатости и утечек – сопоставимым.

Величина утечек пропорциональна давлению, создаваемому рабочим колесом, а также длине и ширине зазора, которая в нефтяных ступенях определяется размером абразивных частиц породы, всегда содержащихся в добываемой жидкости, и при масштабировании не меняется, что ограничивает возможность управления утечками.

Шероховатость поверхности проточных каналов является источником вихрей и связанных с ними потерь при течении вязкой жидкости. Однако, уменьшить вязкие потери можно, если увеличить число Рейнольдса, т.е. частоту вращения вала. Расчеты подтвердили этот вывод и позволили установить закон роста КПД при увеличении частоты вращения вала.

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ

Пиль Н.Е., Кучумов А.Г.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
nikitapil32@gmail.com, kuchumov@inbox.ru*

Аортальный стеноз является одной из самых распространённых патологий аортального клапана, более 15% людей старше 70 лет подвержены этому заболеванию [1]. В результате аортального стеноза происходит сужение клапанного отверстия и/или деформация створок клапана. Тяжелая форма аортального стеноза является одной из основных причин заболеваемости и смертности среди пожилых людей. Ежегодно в мире проводится более 275 000 хирургических операций по замене аортального клапана [2].

Для долгосрочного прогнозирования исходов оперативных вмешательств необходимо биомеханическое моделирование гемодинамики в аортальном клапане. На текущий момент существует множество работ [3–4], в которых используются различные модели материалов для описания биомеханики створок аортального клапана. В настоящей работе проведен численный анализ моделей материала створок аортального клапана для описания гемодинамики в норме и патологии.

Задача решалась в рамках FSI подхода при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics. Построена идеализированная двумерная геометрия аортального клапана на основе анализа УЗИ изображений и литературного обзора. Поток крови моделируется несжимаемой ньютоновской жидкостью с постоянной плотностью и вязкостью. Средние значения числа Рейнольдса составляют около 3685, что говорит о турбулентном характере течения жидкости.

Для моделирования биомеханического поведения створок аортального клапана в норме применяется гиперупругая трехпараметрическая модель Муни-Ривлина. Патологическое состояние створок аортального клапана описывается линейно упругой моделью. Для моделирования свойств створок после проведения операции Озаки используется модель Хольцапфеля-Гассера-Огдена [6].

Полученные результаты описывают изменения полей скорости, давления, WSS и OSI для трех кейсов: состояние в норме, при патологии и при проведении операции Озаки.

Литература

- [1] B. Iung et al., “Contemporary presentation and management of valvular heart disease: The EUobservational research programme valvular heart disease II survey,” *Circulation*, vol. 140, no. 14, pp. 1156–1169, 2019, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.119.041080.
- [2] L. S. de Santo et al., “Mechanical aortic valve replacement in young women planning on pregnancy: Maternal and fetal outcomes under low oral anticoagulation, a pilot observational study on a comprehensive pre-operative counseling protocol,” *J Am Coll Cardiol*, vol. 59, no. 12, pp. 1110–1115, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jacc.2011.10.899.
- [3] G. Luraghi, J. F. R. Matas, M. Beretta, N. Chiozzi, L. Iannetti, and F. Migliavacca, “The impact of calcification patterns in transcatheter aortic valve performance: a fluid-structure interaction analysis,” *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, vol. 24, no. 4, pp. 375–383, 2020, doi: 10.1080/10255842.2020.1817409.
- [4] Y. Feng et al., “Computational modeling for surgical reconstruction of aortic valve by using autologous pericardium,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 97343–97352, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2997605.
- [5] F. Kong, A. Caballero, R. McKay, and W. Sun, “Finite element analysis of MitraClip procedure on a patient-specific model with functional mitral regurgitation,” *J Biomech*, vol. 104, May 2020, doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109730.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЗАБОЙНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В НЕФТЯННОЙ СКВАЖИНЕ

Пинягин Д.С., Костарев Н.А., Труфанова Н.М.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
PinyaginDS@gmail.com*

В настоящее время в нефтедобывающей отрасли в связи с истекшими запасами обычной, легко добываемой высоковязкой нефти остро стоит вопрос о ее добычи. Существует несколько эффективных методов добычи данной нефти. Одним из таких, является добыча высоковязкой нефти при помощи нагрева призабойной зоны скважины при помощи электрических нагревателей. В данной работе рассматривается метод добычи высоковязкой нефти при помощи электрического призабойного нагревателя, который располагается перед электрическим центробежным насосом для обеспечения бесперебойной перекачки нефтяной жидкости. Исследованию процессов течения и теплообмена в нефтяных скважинах посвящено ряд работ [1,2], однако остается открытым вопрос о процессах теплообмена в нефтяной скважине с учетом призабойного нагревателя.

В работе рассматривается 3-х мерная математическая модель процесса теплопереноса [3] в нефтяной скважине с призабойным нагревателем, который используется для скважин с высоковязкой нефтью. Использование локального нагревателя в призабойной области позволяет снизить вязкость нефти, поступающей в насос, обеспечивая тем самым бесперебойную работу скважины. Рассматривалось продольное сечение области нефтяной скважины длиной 10 метров. Скважина состоит из насосно-компрессорной трубы и обсадной колонны. Электрический нагреватель цилиндрический и расположен над забоем скважины. Численная реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных объемов в среде инженерных расчетов Ansys Fluent.

Были разработаны и исследованы математические модели нефтяной скважины с турбулентным и ламинарным течением нефти с учетом призабойного нагревателя. В результате исследования были получены поля скоростей, температур во всем объеме скважины. Построены распределения скоростей и температур по сечению НКТ.

Разработанная модель позволяет принять необходимые меры по снижению вязкости нефти на заранее известном участке, что существенно снизит материальные затраты при разработке месторождений.

Литература

- [1] Каменщиков Ф. А. Тепловая депарафинизация скважин. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 253с.
- [2] Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Т. 72
- [3] Труфанова Н.М., Костарев Н.А. Исследование процесса теплопереноса в нефтяной скважине // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 126-129.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

Пирогова Ю.В., Ташкинов М.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
yu.pirogova@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru*

Материалы с пористой структурой находят широкое применение в различных приложениях. На микромасштабе поры закрытого типа могут быть геометрически описаны в моделях с помощью правильных многогранников. В большинстве систем такие структуры обладают определенной степенью случайности. Их эффективные свойства определяются в первую очередь механическими свойствами матрицы и процентным содержанием неоднородностей, однако форма, распределение пор, а также другие геометрические характеристики также могут оказывать влияние.

В данной работе проведен анализ взаимосвязи между морфологическими параметрами и упругим механическим поведением структур со случайным расположением изолированных включений в виде пор с различными геометрическими характеристиками.

Для детального изучения строения микроструктуры, как правило, используют представительный объем - конечную область образца материала, которая достаточно велика, чтобы содержать существенные локальные морфологические сведения, но значительно меньше, чем характерная длина образца. Исследованы геометрические модели структур с непересекающимися включениями различной формы, с вариацией характеристик их размеров и распределения. С помощью многоточечных моментных функций, полученных методом интегрирования, проведено сравнение морфологических характеристик. Оценка упругих свойств структур производится с помощью расчета эффективного модуля упругости, полученного на основе расчета конечно-элементных моделей.

В ходе анализа установлено, что влияние формы включений на эффективные свойства не является критическим, однако дополнительные концентраторы напряжений, образованные остроугольными включениями, могут оказать влияние на инициацию процессов разрушения представительных объемов. Изучено влияние наличия в структурах аномальных включений на возникновение анизотропии упругих свойств. Сделан вывод о степени соответствии морфологических параметров и упругих свойств. Проанализировано влияние изменения морфологических характеристик на распределение напряжений. Предложенные закономерности, связывающие характеристики внутренней структуры с механическим поведением и свойствами среды, могут быть, например, использованы при создании алгоритмов машинного обучения, позволяющих производить оценку механического поведения структур по данным об их морфологическом строении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596011.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО ОБОБЩЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ КОЛМОГОРОВА

Плотников С.А.¹, Шарифулин А.Н.¹, Вертгейм И.И.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

sharifulin@bk.ru

Рассматривается течение вязкой несжимаемой жидкости в прямоугольном параллелепипеде с периодическими граничными условиями на параллельных гранях. Течение вызвано силой, периодической по двум пространственным координатам (X и Y) и постоянной по времени. На этих гранях задана прокачка с постоянными, но различными значениями расходов Re_x и Re_y . В частном случае гармонической зависимости силы от одной координаты и отсутствие осредненного течения реализуется известное течение Колмогорова [1]. В двумерном случае, когда нет зависимости от координаты Z , ранее многими авторами численно изучены структурные перестройки стационарных решений уравнений Навье-Стокса, определены области устойчивости в пространстве определяющих физических и геометрических параметров – чисел Рейнольдса, амплитуд силы, пространственных размеров ячейки периодичности [2,3]. Было выяснено, что в квадратной области, сторона которой равна пространственному периоду внешней силы, основное стационарное течение сохраняет устойчивость при изменении амплитуды силы и чисел Рейнольдса. Напротив, в ячейках, стороны которых укладывается несколько периодов силы, изменение параметров дестабилизирует стационарное течение.

В настоящей работе исследуется возможный переход таких двумерных течений в трехмерные путем учета зависимости параметров течения от координаты Z . С этой целью полагается, что реализующееся течение имеет периодичность по введенной Z координате. Путем прямого численного моделирования конечно-разностным методом показано, что при умеренных значениях периодичности вдоль Z сохраняется двумерный характер течения [4]. При превышении соотношения периодичностей $L_z / L_x = 4$ наблюдается зависимость параметров реализующегося течения от Z . Дальнейшее увеличение соотношения периодичностей приводит к нестационарным решениям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-51- 12010 ННИО_а) и Немецкого Научно-исследовательского общества (DFG: Projekt ZA 658/3-1). Часть работы выполнена в рамках госбюджетной темы FUUS-2021-0001 “Междисциплинарные исследования в гидродинамике” (ИВ).

Литература

- [1] Обухов А.М. Течение Колмогорова и его лабораторное моделирование // Успехи математических наук. 1983. Т. 38. Вып. 4 (232). С. 101–111.
- [2] Вертгейм И.И., Закс М.А., Сагитов Р.В., Шарифулин А.Н. Неустойчивости, бифуркации и нелинейная динамика в двумерных обобщениях течения Колмогорова //Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 4. С. 11-25.
- [3] Вертгейм И.И., Сагитов Р.В., Шарифулин А.Н. Развитие малых трёхмерных возмущений двумерного дважды периодического течения с прокачкой. В. Кн.: Волны и вихри в сложных средах: 13-ая международная конференция, Москва: Сборник материалов школы. – М.: 2022. С. 58-50.
- [4] Вертгейм И. И., Шарифулин А. Н., Шарифулин В. А., Плотников С. А. Влияние трёхмерных возмущений на структуру и устойчивость двумерного двоякопериодического течения // Международный симпозиум “Неравновесные процессы в сплошных средах”. сборник статей. Пермь: 2021. С.62-67.

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ ЭНДОТЕЛИЯ В ПРОКСИМАЛЬНЫХ ОТДЕЛАХ СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВИДЕОФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

Подольян Н.В.¹, Мизева И.А.², Белавенцева А.В.¹, Камшилин А.А.¹, Мамонтов О.В.³

¹Институт автоматики и процессов управления, ДВО РАН, Владивосток

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

³ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург

Podolian@iacp.dvo.ru, mizeva@icmm.ru, ange202@mail.ru, alexei.kamshilin@yandex.ru,
mamontoffoleg@gmail.com

Эндотелий играет важнейшую роль в регуляции кровотока в кровеносной системе на всех ее уровнях. Нарушение функции эндотелия сопровождается целым рядом сердечно-сосудистых заболеваний и зачастую проявляется на ранних, доклинических стадиях заболеваний. В основу предложенного метода оценки функции эндотелия легла современная технология визуализирующей фотоплетизмографии (вФПГ) [1] с последующим вейвлет-анализом полученных временных рядов. В исследование включены две группы добровольцев: группа контроля (N=17, средний возраст 49.3 ± 13.7 лет) и группа со стажем курения не менее 28 лет (N=17, средний возраст 51.3 ± 7.8 лет). Всем участникам исследования после адаптации к условиям лаборатории проводилось измерение перфузии при локальном тепловом тесте, запись проводилась на предплечье правой руки, в течение 40 минут, из них первые 5 минут в покое, с 6й по 20-ю минуты при нагреве $40-42^\circ\text{C}$.

Спектральный состав полученных сигналов в диапазоне частот от 0.01 до 2 Гц проводился при помощи вейвлет-разложения. В данном диапазоне частот традиционно выделяют частотные полосы, связанные с эндотелиальным, нейрогенным, миогенным механизмам регуляции сосудистого тонуса, а также дыхательной и пульсовой волной. С точки зрения анализа функции эндотелия наибольший интерес представляет полоса частот 0.01-0.02 Гц. Нами обнаружено, что во время фазы вазодилатации, связанной с синтезом оксида азота NO эндотелием, энергия колебаний в диапазоне частот 0.01-0.02 Гц у добровольцев в группе контроля и со стажем курения достоверно различна ($p=0.002$). Таким образом, в работе впервые продемонстрирована возможность применения метода в ФПГ для выявления функции эндотелия в проксимальной сосудистой системе человека. Предложенный метод показал значительное снижение энергии колебаний именно в диапазоне частот 0.01-0.02 Гц у добровольцев со стажем курения, что можно интерпретировать как нарушение у них функции эндотелия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-15-00265.

Литература

- [1] Kamshilin A. A. et al. Novel Method to Assess Endothelial Function via Monitoring of Perfusion Response to Local Heating by Imaging Photoplethysmography //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 15. – С. 5727.
- [2] Stefanovska A., Bracic M., Kvernmo H. D. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique //IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1999. – Т. 46. – №. 10. – С. 1230-1239.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Полуянов А.О., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
poluyanov.a@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Конфигурация с затопленной струей жидкого металла часто встречается в различных технических приложениях. В качестве примера можно привести смеситель разнотемпературных потоков теплоносителя. Его применение обусловлено необходимостью отбора теплоносителя в различные системы контроля на атомных станциях на быстрых нейтронах. В этих системах, как правило, температура жидкого натрия снижается. При возврате охлажденного жидкого натрия в магистральный трубопровод может возникнуть следующая проблема. Смешение интенсивных потоков в большинстве режимов приводит к появлению гидродинамических пульсаций скорости. Если потоки имели разные температуры на входе, то это приведет к пульсации температуры в зоне смешения Т-образного соединения [1]. В случае, если зона смешения контактирует со стенкой канала, то в стенке возникнет термоциклическая усталость материала, которая может привести к появлению трещин. Для снижения этого эффекта смеситель может быть выполнен в виде затопленной струи, когда один из потоков вводится в другой с помощью трубки-вставки. Но, даже в этой ситуации неизбежно появление температурных пульсаций в потоке. Возникает вопрос, можно ли предложить универсальный способ снижения этого нежелательного эффекта?

В данной работе рассматривается способ влияния на эти пульсации с помощью бесконтактной генерации объемных электромагнитных сил. Следует отметить, что техническая реализация данного способа должна быть относительно простой, надежной и, как следствие, не очень затратной, чтобы была возможность применять ее к большому количеству соединений трубопроводов. Поэтому, в отличие от работы [2], рассматриваемая конфигурация представляет собой короткий соленоид, размещенный снаружи области смешения потоков, который создает переменное магнитное поле в потоке. Взаимодействие магнитного поля и индуцированного им вихревого тока приводит к генерации электромагнитной силы, которая действует в радиальном направлении от периферии к центру ячейки, вызывая перемешивающее вихревое течение.

Взаимодействие этого течения с затопленной струей изучается в данном исследовании путем математического моделирования. Модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в безындукционном приближении. Турбулентность описывается с помощью полуэмпирического подхода. Численное моделирование проводится в пакете Ansys Emag и Fluent. Изучены основные характеристики поля скорости в некотором диапазоне параметра силового воздействия и параметров струйного течения. Результаты позволят подобрать параметры, необходимые при разработке электромагнитного аппарата для снижения температурных пульсаций в зоне смешения.

Литература

- [1] Колесниченко И., Фрик П., Халилов Р., Павлинов А., Мамыкин А., Шестаков А., Васильев А., Крылов А., Пахолков В., Рогожкин С. Смешение разнотемпературных потоков жидкого натрия в Т-образном соединении цилиндрических каналов // Теплоэнергетика. – 2023 (принята к печати).
- [2] Листратов Я.И., Разуванов Н.Г., Беляев И.А., Свиридов Е.В. Динамика затопленного струйного течения в трубе в продольном магнитном поле // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, №4. – С. 480-494.

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКОГО СОЛЕНоиДА

Полуянов А.О., Колесниченко И.В.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
poluyanov.a@icmm.ru, kiv@icmm.ru*

Работа посвящена изучению бесконтактного способа генерации течения жидкого металла. Конечной целью является контроль характеристик такого течения для реализации неинвазивной методики оценки степени взаимодействия фаз в двухфазной среде. Такая оценка востребована при верификации математической модели электромагнитного управления фазами в двухфазной среде. Для этого необходима информация о гидродинамических характеристиках в относительно простой конфигурации исследуемого объема среды. Результаты исследования применяются при разработке электромагнитных устройств для управления фазами в двухфазных электропроводных средах. Речь идет об электромагнитных перемешивателях [1], которые гомогенизируют примеси в расплавленных металлах, а также электромагнитных сепараторах [2], которые извлекают примеси из металла. В данной работе рассматривается конфигурация, состоящая из соленоида, подключенного к источнику переменного тока заданной силы и частоты. Внутри соленоида помещается цилиндрическая ячейка, заполненная электропроводной жидкостью. Жидкий металл пронизывается магнитным полем с переменным потоком, что приводит к генерации вихревого электрического тока. Линии этого тока представляют собой окружности в случае однородной среды. Взаимодействие магнитного поля и вихревого тока приводит к генерации электромагнитной силы, которая действует в радиальном направлении от периферии к центру ячейки. Конфигурация с такой обжимающей электромагнитной силой хорошо известна под названием пинч, однако сила не имеет вихревой компоненты только для бесконечно длинных соленоида и ячейки. В нашем случае рассматриваются ограниченные в осевом направлении соленоиды и ячейки, поэтому электромагнитная сила будет иметь вихревую компоненту, что неизбежно приведет к возникновению вихревого течения. Эти течения изучаются в данном исследовании путем математического моделирования. Модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в безындукционном приближении. Это позволяет отдельно исследовать электродинамическую и гидродинамическую части задачи. Турбулентность описывается с помощью полуэмпирического подхода. Численное моделирование проводится в пакете Ansys Emag и Fluent. На данном этапе изучена устойчивость решения относительно выбранных управляющих параметров, а также степени дискретизации расчетной области и времени. Сопоставляются решения, полученные при различных параметрах турбулентных моделей. Изучены основные характеристики поля скорости в некотором диапазоне параметра силового воздействия. Оценено время развития течения и его интенсивность в равновесном состоянии.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края №22-19-20106, <https://rscf.ru/project/22-19-20106/>.

Литература

- [1] Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // *Magneto hydrodynamics*. – 2014. – V. 4. – P. 249-265.
- [2] Kolesnichenko I. Investigation of electromagnetic force action on two-phase electrically conducting media in a flat layer // *Magneto hydrodynamics*. – 2013. – V. 49. – P. 217-222.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕПРЕГОВ, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭДТ-69Н, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ КАК КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ИЗДЕЛИЯХ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

Поморцева Т.Н.¹, Осоргина И.В.¹, Шадрин В.В.², Мерзляков А.Ф.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²ИМСС УрО РАН, Пермь

tata.lisica@yandex.ru, osorgina@psu.ru, shadrin@icmm.ru, merzlyakov@psu.ru

Развитие современной космонавтики требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. Очень перспективными с этой точки зрения являются препреги, созданные на основе эпоксидных смол. Конструкции, элементы которых изготовлены из таких материалов, обладают высокой прочностью, более малым весом, чем металлические, а также же они хорошо упаковываются. Интерес исследователей в этой области вызывает поведение препрегов на околоземной орбите при разворачивании конструкции, ее отверждении и дальнейшей эксплуатации. Такой интерес обусловлен тем, что в открытом космосе объект находится в условиях высокого вакуума, радиации, подвержен резким изменениям температуры (от -80°C до $+130^{\circ}\text{C}$). Реальные исследования препрегов в условиях космоса весьма дорогостоящие, поэтому целесообразно проводить предварительные лабораторные эксперименты с созданием определенных условий.

В данной работе обсуждается применение препрегов, созданных на основе эпоксидной смолы ЭДТ-69Н и стеклоткани конструкционного назначения Т-10. Исследуется препрег горячего отверждения, который может в условиях открытого космоса нагреться за счет солнечного излучения.

В работе приводятся результаты исследования структуры ткани Т-10 на основе стекловолокон с помощью оптической микроскопии. Осуществлены исследования механических свойств отвержденных образцов смолы ЭДТ-69Н в диапазоне температурах от $+23^{\circ}\text{C}$ до 140°C . Исследован переход от упругого к вязкоупругому поведению при высоких температурах испытаний. Обнаружено накопление остаточных деформаций, связанных с особенностями поведения материала в режиме вынужденной эластичности. Проведены эксперименты с препрегами, отвержденными в вакууме (что ближе к условиям отверждения в космосе) и в условиях обычного атмосферного давления. Нагружение осуществлялось при разных температурах в направлениях ниток основы ткани, в направлении ниток утка и под 45° к ориентации ниток. Обнаружены эффекты влияния температуры на поведение отвержденных препрегов, которые аналогичны проявившимся ранее в образцах из эпоксидной смолы. Установлено, что в условиях отверждения в вакууме напряжения в препреге заметно ниже по сравнению с напряжениями в образцах, отвержденных при обычном атмосферном давлении. Показано, что это явление связано с испарением отвердителя в вакуум в процессе изготовления материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/1025.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ФОРМЫ НА СЕГРЕГАЦИЮ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В N-УГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

Попов Е.С., Гончаров М.М., Буркова Е.Н., Юрина А.Д.

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
yevgeniy.popov.0101@mail.ru

Работа посвящена численному исследованию фактора формы в задачах о сегрегации магнитной жидкости. Рассматривается геометрия, представляющая собой полость N угольной формы, заполненной однородной магнитной жидкостью (Рисунок 1). В жидкости размещается исследуемый парамагнитный образец с сечением в форме правильного многоугольника. Помещенный во внешнее однородное магнитное поле материал образца намагничивается, что приводит к появлению градиентов модуля напряженности и, как следствие, концентрации магнитной жидкости. Возникающие неоднородности создают нескомпенсированное давление на поверхность магнитного материала, приводящее к появлению выталкивающей силы [1].

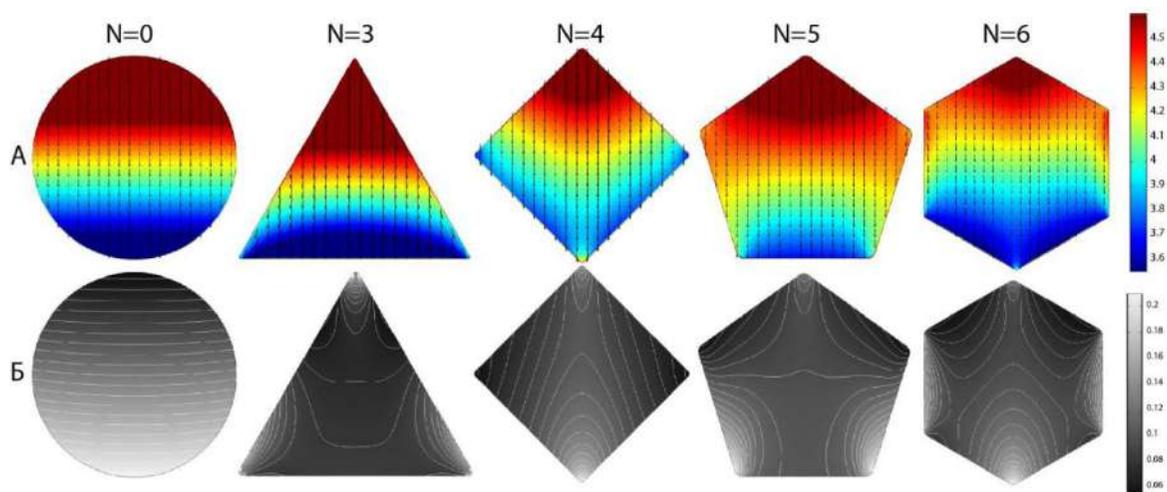


Рисунок 1 – А - Размагничивающие поля в различных полостях, Б - изолинии концентрации, N-количество углов полости

Величина и направление этой силы, а также степень сегрегации магнитной жидкости, находятся в зависимости от интенсивности внешнего поля, формы и положения образца [2].

Так же в ходе данной работы исследована сегрегация магнитной жидкости в зависимости от количества углов полости. Выявлено, что наиболее высокий коэффициент сегрегации имеет треугольная полость по сравнению с остальными полостями.

Литература

- [1] Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 357 с.
- [2] Kuznetsov A.A. Pshenichnikov A.F. Sedimentation equilibrium of magnetic nanoparticles with strong dipole-dipole interactions // Physical Review E. – 2017. – №. 95. – С. 032609.

ВЛИЯНИЕ АСПЕКТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ БАРОКЛИННЫХ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

Попова Е.Н., Сухановский А.Н., Васильев А.Ю.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
san@icmm.ru*

Лабораторные аналоги атмосферных течений позволяют на основе хорошо воспроизводимых экспериментов изучать фундаментальные основы сложных динамических процессов, тестировать существующие гипотезы, находить новые эффекты, формулировать актуальные проблемы и строить теоретические модели [1]. Основным подходом для лабораторного моделирования атмосферной циркуляции в средних широтах является конвекция во вращающемся цилиндрическом зазоре с изотермическими стенками, теплоизолированным дном и твердой или свободной верхней поверхностью. Данная система позволяет воспроизвести крупномасштабную циркуляцию и бароклинные волны, которые обеспечивают транспорт тепла от экватора к полюсу. Использование вертикальных изотермических стенок в модели [1] накладывает ряд ограничений [2]. Попытка уйти от основных ограничений модели [1] была предпринята в [2], где источник тепла располагался на периферии дна, а холодильник в виде диска был расположен в верхней части центральной области цилиндрического зазора. Было показано, что конвекция в предложенной лабораторной модели имеет более сложную, чем в [1] пространственную структуру, характеризуется взаимодействием свободной конвекции и бароклинных волн. Еще одним важным фактором является геометрия слоя. В моделях [1] и [2] аспектное отношение Γ (высота слоя к ширине цилиндрического зазора) было равно 1 и 0.65 соответственно. В [3,4] была реализована новая лабораторная модель, в которой кольцевой нагреватель смещен от боковой внешней стенки и для значительно большего значения аспектного отношения $\Gamma \approx 0.09$. Новая лабораторная модель воспроизводит основные черты глобальной атмосферной циркуляции, а именно антициклоническое течение на малых широтах, циклоническую циркуляцию в области средних и полярных широт, формирование крупномасштабных бароклинных вихрей и три меридиональные ячейки (Хэдли, Ферреля и полярную). Для того чтобы бы оценить влияние аспектного отношения в модели [3,4] были проведены измерения для большей толщины слоя ($\Gamma \approx 0.17$).

Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 22-21-00572.

Литература

- [1] Read P.L., Pérez Edgar P., Moroz Irene M., Young Roland M.B. General Circulation of Planetary Atmospheres: Insights from Rotating Annulus and Related Experiments // Modeling Atmospheric and Oceanic Flows: Insights from Laboratory Experiments and Numerical Simulations, American Geophysical Union, 2014, 368p.
- [2] Scolan H., Read P. L. A rotating annulus driven by localized convective forcing: a new atmosphere-like experiment // Experiments in Fluids. – 2017. – Т. 58. – №. 6. – С. 75.
- [3] Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Режимы течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // Пермские гидродинамические научные чтения: сборник статей по материалам VIII Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова / отв. ред. Т. П. Любимова. Пермь, 2022. 537 с. стр. 434-438.
- [4] Sukhanovskii A., Popova E.A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // arXiv preprint arXiv:2210.15266. – 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.15266>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ И ЗАДАЧ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Прууэл Э.Р.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН г. Новосибирск
pru@hydro.nsc.ru*

В докладе представлены текущие возможности исследовательских станций на базе ускорительного комплекса ВЭППЗ/ВЭПП4 Института ядерной физики г. Новосибирск – скоростной рентгенографии и малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением. Большая импульсная мощность пучка синхротронного излучения и разработанные скоростные рентгеновские детекторы позволили создать методику регистрации одномерного щелевого кино с промежутком между кадрами 124 нс и пространственным разрешением на объекте 0.1 мм.

Рентгенографическая методика позволяют исследовать газодинамическое течения непосредственно в процессе детонации конденсированных взрывчатых веществ или при ударно-волновом воздействии на инертные материала. Она успешно применяется для определения параметров детонации и уравнения состояния продуктов взрыва.

Методика малоуглового рентгеновского рассеяния чувствительна к неоднородностям плотности с масштабом 5-100 нм. Она нашла эффективное применение для исследования формирования конденсированного углерода при детонации взрывчатых веществ, горения металлических порошков и анализа поведения наноструктурированных материалов в условиях ударного нагружения.

В последние годы активно развиваться направление исследование структуры материалов методами микротомографии и дифракции в условия квазистатического нагружения (сжатие, растяжение, изги). Первый метод позволяет определять 3d матрицу плотности исследуемого объекта с пространственным разрешением 3 мкм и находи применение при анализе микрповреждений в структуре преднагруженных материалов. Метод дифракции позволяет определять фазовый состав и микроструктуру зерен материала.

В докладе описано текущее состояние исследований: характеристики установок, полученные результаты и истории успеха взаимодействия с другими организациями; и планы новой станции на строящемся ускорительном комплексе «СКИФ».

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНЫ В ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛАХ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

Пшеничнов С.Г.

Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
serp56@yandex.ru

Материалы, обладающие пространственной неоднородностью, широко используются в современной технике и являются предметом исследования во многих областях естествознания. Этим объясняется возрастающий интерес к изучению функционально-градиентных материалов (ФГМ) с непрерывной зависимостью физико-механических параметров от пространственных координат и, в том числе, к исследованию волновых процессов в таких материалах. Современные достижения в области изучения динамики ФГМ изложены, например, в обзорных работах [1,2], где обсуждаются исследования волновых процессов в телах, состоящих из упругих, пьезоэластичных, термоупругих и вязкоупругих ФГМ. При этом заметим, что количество публикаций, посвященных динамике вязкоупругих ФГМ, относительно невелико. В основном исследовались стационарные волны в рамках вязкоупругой модели Кельвина-Фойгта, в том числе дробного порядка [3], а также гармонические колебания с моделью стандартного вязкоупругого тела [4]. В указанных работах содержатся ссылки на прочие публикации по данной теме.

Изучение нестационарных волн в ФГМ началось еще в прошлом столетии и продолжается в настоящее время. И все же подавляющее большинство известных на сегодня публикаций по динамике ФГМ посвящено именно стационарным волновым процессам.

Целью данной работы является исследование нестационарной динамики некоторых тел, состоящих из вязкоупругого ФГМ. Применен подход, использовавшийся в стационарных динамических задачах для упругих, пьезоэластичных и термоупругих ФГМ [5], который состоит в аппроксимации непрерывно-неоднородного материала слоистой структурой с условиями непрерывности на границах раздела слоев. Это позволило использовать методы решения нестационарных задач для слоистых вязкоупругих тел [6,7] и исследовать характер переходных волновых процессов в ФГ слое и цилиндре при конкретных исходных данных.

Литература

- [1] Жаворонок С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 1 // Механика композиционных материалов и конструкций – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 227 – 260. doi: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.02.227_260.06.
- [2] Жаворонок С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 2 // Механика композиционных материалов и конструкций – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 36 – 86. doi: 10.33113/mkmk.ras.2022.28.01.036_086.03.
- [3] Zhang, X.; Li, Z.; Wang, X.; Yu, J.G. The fractional Kelvin-Voigt model for circumferential guided waves in a viscoelastic FGM hollow cylinder. Applied Mathematical Modelling – 2021. – V. 89, Part 1 – P. 299-313. doi: 10.1016/j.apm.2020.06.077.
- [4] Ватульян А.О., Варченко А.А. Исследование колебаний балки из функционально-градиентного материала с учетом затухания // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2021. № 4. – С. 10 – 18. doi: 10.18522/1026-2237-2021-4-10-18.
- [5] Ларин Н.В. Дифракция плоской звуковой волны на термоупругом шаре с дискретно-неоднородным покрытием // Прикладная механика и техническая физика – 2018. – Т.59, №6 – С. 65–74. doi: 10.15372/PMTF20180607.
- [6] Пшеничнов С.Г. Динамические задачи линейной вязкоупругости для кусочно-однородных тел // Изв. РАН. МТТ. – 2016 – № 1. – С. 79-89.
- [7] Pshenichnov S., Ivanov R., Datcheva M. Transient Wave Propagation in Functionally Graded Viscoelastic Structures // Mathematics – MDPI: 2022. – Vol. 10. – 4505. doi: 10.3390/math10234505.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ НА МАГНИНЫЕ СВОЙСТВА АНСАМБЛЯ НЕПОДВИЖНЫХ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

Радужнов Д.И.¹, Соловьева А.Ю.¹, Елфимова Е.А.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Dmitry.Radushnov@urfu.ru, Anna.Soloveva@urfu.ru, Ekaterina.Elifimova@urfu.ru

Работа посвящена теоретическому изучению влияния полидисперсности на магнитные свойства ансамбля неподвижных феррочастиц с учетом ориентационной анизотропии. Модель основывается на следующих предположениях. До полимеризации жидкой среды магнитные наночастицы свободно перемещались за счет броуновского движения, поэтому магнитные моменты \mathbf{m} и оси легкого намагничивания \mathbf{n} могли изменять свою ориентацию вместе с вращением тела частицы. Под воздействием внешнего магнитного поля \mathbf{h}_p , и межчастичных корреляций феррочастицы упорядочиваются в некую ориентационную структуру, после чего происходит полимеризация системы (рисунок 1(а)). Затем на синтезированный феррокомпозит действует постоянное магнитное поле другой интенсивности \mathbf{h} (рисунок 1(б)). Дальнейшая реакция магнитных моментов частиц на внешнее магнитное поле носит суперпарамагнитный характер, который определяется неелевским механизмом.

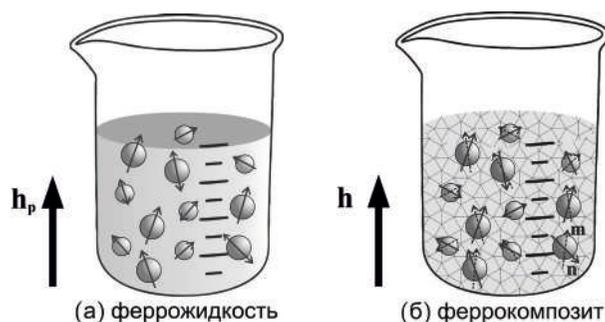


Рисунок 1 – Схематическая иллюстрация рассмотренных образцов: (а) суспензия магнитных частиц, вовлеченных в броуновское движение; (б) «замороженная» конфигурация положений магнитных частиц и направлений осей легкого намагничивания. Сплошные стрелки иллюстрируют направления осей легкого намагничивания, пунктирные стрелки показывают ориентации магнитных моментов частиц.

Аналитическое выражение для намагниченности полимеризованного феррокомпозита было получено с помощью вириального разложения с точностью до первого порядка по концентрации фракций дипольных частиц и интенсивности диполь-дипольных взаимодействий. Проанализировано влияние разных фракций на структурные и магнитные свойства системы. Теоретически определена функция, описывающая ориентационную структуру ансамбля неподвижных феррочастиц после полимеризации системы. Обнаружено, что при любых условиях в бидисперсной системе всегда есть такой угол, для которого вероятность ориентации под этим углом осей легкого намагничивания больших и мелких частиц одинаковая. Также было проведено независимое компьютерное моделирование методом Монте-Карло (МК). Полученные данные из метода МК хорошо согласуются с результатами теории для намагниченности, второго момента и плотности вероятности ориентации осей легкого намагничивания под заданным углом.

Компьютерное моделирование, было проведено Соловьева А.Ю. в рамках проекта Минобрнауки России «Уральский математический центр» соглашение № 075-02-2022-877. Теоретическая часть работы выполнена Радужновым Д.И. и Елфимовой Е.А. в рамках гранта № 22-1-2-37-1 Фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО И ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА

Роговой А.А., Столбова О.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rogovoy@icmm.ru, sos@icmm.ru

Сплавы Гейслера являются функциональными материалами, они способны изменять свои размеры и форму при воздействии внешнего магнитного поля. При охлаждении таких материалов из высокотемпературной фазы с кубической кристаллической решеткой (аустенитное состояние) без приложения механической нагрузки в процессе прямого фазового перехода первого рода в низкотемпературной фазе образуются двойниковые структуры с тетрагональной кристаллической решеткой (мартенситное состояние). При приложении напряжения и/или внешнего магнитного поля происходит раздвоение этих структур, что приводит к возникновению значительной деформации до 6–10 % [1].

В данной работе на основе микроструктурного подхода построена модель магнитного и деформационного поведения сплава Гейслера. В рамках теории микромагнетизма, используя вариационный аналог уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта, было выполнено численное моделирование эволюции магнитной микроструктуры сдвойникового варианта мартенсита сплава Гейслера Ni_2MnGa во внешнем магнитном поле и построены кривые намагничивания. Опираясь на полученные результаты, рассмотрена система, составленная из нескольких сдвойниковых вариантов мартенсита, расположенных в плоскости под разными углами друг к другу. Такая структура моделирует поведение поликристаллического материала и является представительным объемом для него на макроуровне. Был рассмотрен изотропный поликристалл, состоящий из 17 сдвойниковых монокристаллов одинакового объема, расположенных под разными углами, а также текстурированные поликристаллы, в которых имеется преобладающее направление ориентации мартенситных структур. Построены кривые намагничивания для таких поликристаллов. Для текстурированных поликристаллов кривые намагничивания различаются в зависимости от направления приложенного магнитного поля, поскольку такие поликристаллы анизотропны. На построенных кривых наблюдается скачок намагниченности в некотором критическом поле, возникающий в процессе раздвоения. Предложен критерий раздвоения при действии только магнитного поля, который использован для определения компонент тензора деформаций, возникающего в изотропных и анизотропных поликристаллических материалах в процессе раздвоения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-01-00031).

Литература

[1] Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев [и др.] // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 6. – С. 577-607.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ В ПРОЦЕССЕ ПОСТИМПЛАНТАЦИОННОГО ОСТЕОГЕНЕЗА НА ГРАНИЦЕ ИМПЛАНТАЦИОННО-КОСТНОГО БЛОКА

Роготнев А.А.¹, Игнатова А.М.², Наймарк О.Б.²

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rogotnev.a@icmm.ru, iampstu@yandex.ru, naimark@icmm.ru

Остеоинтеграцией называется процесс, проходящий на границе кость-имплантат и заключающийся в соединении структур костной ткани с имплантатом благодаря образованию костной субстанции на поверхности имплантата с отсутствием прослойки соединительной (волокнутой) ткани [1, 2]. В основе данного процесса лежит остеогенез [2].

Целью данной работы является разработка математической модели, что описывает гистологическую картину, возникающую на границе имплантационно-костного блока в процессе остеогенеза. Верификация модели будет проводиться по данным изображений микроскопии гистологических срезов костных тканей в зоне контакта с имплантатом, полученным через 6 и 9 месяцев после установки имплантата. Полученные изображения в ходе компьютерной обработки сегментируются на четыре составляющие: волокнустая ткань, костная ткань, ядра клеток и области ткани, не использованные в анализе. Соотношение данных компонентов как раз и составляет гистологическую картину.

Наша математическая модель построена на основе моделей популяционной динамики, нашедших свое применение в различных областях, например в химической кинетике [3] или динамике заболеваемости [4]. Модель позволяет описывать изменение каждого из четырех компонентов гистологического среза в любой момент времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ 122031400671-1)

Литература

- [1] Поройский С.В., Михальченко Д.В., Ярыгина Е.Н., Хвостов С.Н., Жидовинов А.В. К вопросу об остеоинтеграции дентальных имплантатов и способах ее стимуляции // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2015. – № 3 (55). – С. 6-9.
- [2] Мирсаева Ф.З., Убайдуллаев М.Б., Вяткина А.Б., Фаткуллина С.Ш. Дентальная имплантология: уч. пособие – Уфа: Изд. ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2015. – 124 с.
- [3] Замаев К. И. Химическая кинетика: Курс лекций: В 3 ч./ Под ред //А.Г. Окунева, К.П. Брылякова. Новосибирск: Изд. НГУ, 2004. – Ч. 1, 108 с.
- [4] Зарипов Ш.Х., Никоненкова Т.В., Толмачева С.А. Модели динамики популяций на основе дифференциальных уравнений: реализация в среде R: учебно-методическое пособие – Казань: Изд. КФУ, 2017. – 30 с.

МОДИФИКАЦИЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
k.a.kriv@mail.ru, shveykin@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Применение многоуровневых конститутивных моделей (КМ), основанных на физических теориях пластичности (ФТП) [1], является весьма перспективным для исследования и совершенствования процессов термомеханической обработки материалов, так как в моделях данного класса на различных масштабных уровнях явным образом учитываются взаимодействующие механизмы деформирования и эволюционирующая структура материала, определяющая физико-механические свойства готового изделия. Поэтому актуальным является построение многоуровневых КМ ФТП для создания технологических процессов формования металлов и сплавов, с помощью которых можно получить изделия с лучшими эксплуатационными свойствами (функциональные материалы-конструкции) [1].

Для процессов механической обработки, проходящих при комнатной температуре, приоритетным процессом изменения зеренной структуры является измельчение (фрагментация). Актуальность моделирования процесса измельчения обусловлена в первую очередь повышением эксплуатационных свойств изделий, в частности, увеличением предела текучести (закон Холла-Петча) и предела прочности.

В работе модифицируется двухуровневая статистическая КМ для описания неупругого деформирования ГЦК-поликристаллов, учитывающая в качестве основного механизма деформирования внутриверенное скольжение краевых дислокаций и ротации решеток кристаллитов [1]. В базовую двухуровневую КМ ФТП были включены соотношения физической модели ЕТМВ (Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet) [2, 3], описывающие эволюцию среднего размера ячейки при деформировании. Для физически более точного описания происходящих в ходе измельчения зеренной структуры процессов для некоторых соотношений модели ЕТМВ были использованы известные в литературе модификации.

Двухуровневая КМ с модифицированной ЕТМВ моделью была применена для описания начальной стадии фрагментации поликристаллической меди при равноканальном угловом прессовании при комнатной температуре. Полученные результаты вычислительных экспериментов находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.
- [2] Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation // *Acta Mater.* – 1998. – Vol. 46, № 15. – Pp. 5509–5522.
- [3] Toth L.S., Molinari A., Estrin Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model // *J. Eng. Mater. Tech.* – 2002. – Vol. 124. – Pp. 71–77.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ПОСТАНОВКАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ И СТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ

Рублев И.А., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург
ilya_rublev@mail.ru, alexander.freidin@gmail.com

Исследуется нестационарная задача описания распространения фронта локализованной химической реакции между деформируемым твердым и диффундирующим компонентами в упругом теле. Химическое превращение сопровождается собственной деформацией и изменением модулей упругости материала. Для описания влияния напряжений на скорость фронта реакции используется кинетическое уравнение, согласно которому скорость фронта реакции определяется нормальной компонентой тензора химического сродства. Выражение для тензора сродства было получено как следствие выражения для производства энтропии на фронте реакции, которое следовало из фундаментальных законов и второго закона термодинамики в виде неравенства Клаузиуса – Дюгема (см. обзор [1]). В приближении стационарной диффузии задача исследовалась ранее (см., напр., [2-4]). Нестационарная диффузия в одномерной постановке обсуждалась в [5]. В данной работе решена осесимметричная задача для распространения фронта в цилиндре.

Диффузия описывается уравнением нестационарной диффузии, которое соответствует закону Фика. Выделены стадия первоначального накопления диффундирующего компонента, момент отщепления фронта реакции от внешней границы тела, и дальнейшее распространение фронта, поддерживаемое диффузией. Моменту отщепления соответствует достижение концентрацией на границе критического значения, зависящего от напряжений, порождаемых деформацией превращения и внешней нагрузкой, и соответствующего нулевому значению нормальной компоненты тензора сродства. Исследована зависимость времени начала реакции от параметров диффузии, константы скорости реакции, собственной деформации превращения и модулей упругости компонентов реакции. Найденное на первом этапе распределение диффундирующего компонента в момент начала реакции определяет начальное условие для этапа распространения фронта реакции. Построены зависимости скорости фронта реакции от его положения. Путем сравнения численных решений задачи в стационарной и нестационарной постановках, проведено исследование влияния учета нестационарности диффузии на распространение фронта. Показано, что учет нестационарности особенно сильно влияет на начальной стадии распространения фронта. Исследовано как относительное положение зависимостей скорости фронта зависит от конкурирующего влияния химической энергии и энергии деформаций.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П).

Литература

- [1] Freidin A. B., Vilchevskaya E. N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Encyclopedia of Continuum Mechanics. Altenbach H., Öchsner A. (eds) Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [2] Freidin A. B., Vilchevskaya E. N., Korolev I. Stress-assisted chemical reactions front propagation in deformable solids // Int. J. Eng. Sci. 2014. V. 83. P. 57-75.
- [3] Poluektov M., Freidin A. B., Figiel Ł. Modelling stress-affected chemical reactions in non-linear viscoelastic solids with application to lithiation reaction in spherical Si particles // Int. J. Eng. Sci. 2018. V. 128. P. 44-62.
- [4] Freidin A. B., Morozov A., Muller W. H. Propagation and stability of chemical reaction fronts in coupled problems of mechanochemistry // AIP Conference Proceeding. 2021. 2371:020002.
- [5] Рублев И.А., Королёв И.К., Фрейдин А.Б. Одномерная задача о распространении фронта химической реакции в упругом теле. Неделя науки ФизМех. Сб. статей Всероссийской научной конференции 4-9 апреля 2022 года. СПб.: Политех-Пресс. 2022. С. 221-223.

НЕЛИНЕЙНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ АНСАМБЛЯ ПЛОСКИХ РОТАТОРОВ В ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ

Русаков В.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

yvr@icmm.ru, raikher@icmm.ru

Объектом рассмотрения – моделью вязкоупругого ферроколлоида – является ансамбль невзаимодействующих плоских броуновских ротаторов (дисков), находящихся в вязкоупругой жидкости Джеффриса. Предполагается, что каждая частица имеет постоянный магнитный дипольный момент, который «вморожен» в её тело и лежит в плоскости моделирующего диска.

Уравнение Фоккера-Планка, описывающее кинетику изучаемого ансамбля с помощью многомерной функции распределения, преобразовано в цепочечную систему, переменными которой являются статистические моменты этой функции. Построена процедура получения решения указанной системы с произвольной точностью – то есть эквивалент её точного решения – для случая, когда модельный ферроколлоид находится под действием внешнего переменного магнитного поля. Тем самым, оказалось возможным полностью учесть влияния запаздывающего трения на макроскопические неравновесные характеристики ансамбля – динамическую магнитную восприимчивость (линейную и кубическую) и сигнал двойного лучепреломления (квадратичен по амплитуде переменного поля).

Проведено сравнение рассчитанных по этой методике частотных зависимостей (спектров) магнитных и ориентационно-оптической восприимчивостей с соответственными спектрами, полученными ранее в приближении «эффективного поля» (ПЭФ). В последнем для описания неравновесного состояния используются только несколько первых моментов функции распределения. Показано, что в допустимом диапазоне материальных параметров модельного ферроколлоида ПЭФ качественно верно передаёт основные особенности отклика системы во всем представляющем реальный интерес интервале частот.

МАГНИТНЫЙ ОТКЛИК КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ФЕРРОЖИДКОСТИ НА ПЕРЕМЕННОЕ ПОЛЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ

Русанов М.С., Елфимова Е.А., Зверев В.С.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург
rusanoff.mixail@yandex.ru

В работе изучается магнитный отклик феррожидкости на переменное магнитное поле произвольной амплитуды. Одной из главных характеристик, описывающей реакцию феррожидкости на магнитное поле H , является намагниченность $M(H)$. Теоретическое изучение намагниченности основывается на ее разложении в ряд по H :

$$M(H) = \chi_1 H + \chi_3 H^3 + \dots$$

Коэффициенты χ_1 и χ_3 называют линейной магнитной восприимчивостью и третьей гармоникой соответственно. В случае малых амплитуд переменного поля в одночастичном приближении для этих коэффициентов известны аналитические формулы. Линейную восприимчивость описывает классическая теория Дебая, аналитическая формула для третьей гармоники определена в работе [1]. Учет диполь-дипольного взаимодействия в линейную восприимчивость рассмотрен в работе [2]. Влияние амплитуды переменного поля на линейную восприимчивость и третью гармонику в одночастичном приближении изучался в статье [3]. В настоящей работе исследовано влияние одновременно обоих факторов на χ_1 и χ_3 : амплитуды переменного поля и межчастичных взаимодействий. Для этого феррожидкость моделировалась монодисперсной системой подвижных взаимодействующих частиц. Предполагалось, что реакция магнитных моментов частиц на переменное магнитное поле происходила только по броуновскому механизму. Намагниченность системы определялась на основе решения уравнение Фоккера-Планка для плотности вероятности ориентации магнитного момента. Уравнение Фоккера-Планка было решено с использованием численной схемы, предложенной в работе [4]. Численное моделирование позволило получить χ_1 и χ_3 для различных значений амплитуды поля, концентрации частиц и интенсивности диполь-дипольных взаимодействий. Используя численные результаты, с помощью метода наименьших квадратов были получены простые приближенные формулы для χ_1 и χ_3 . Результаты для линейной восприимчивости представлены в статье [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Уральский математический центр» (номер соглашения 075-02-2022-877).

Литература

- [1] Raikher Y.L., Stepanov V.I. Nonlinear Dynamic Susceptibilities and Field-Induced Birefringence in Magnetic Particle Assemblies // *Advances in Chemical Physics*. – 2004. – V.129.
- [2] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S. Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles // *Soft Matter*. – 2016. – V. 12 (15). – P.3507–3513.
- [3] Yoshida T., Enpuku K. Simulation and quantitative clarification of ac susceptibility of magnetic fluid in nonlinear brownian relaxation region // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2009. – V. 48 (12R).
- [4] Afanas'eva N., Vabishchevich P.N., Vasil'eva M.V. Unconditionally stable schemes for convection-diffusion problems // *Russian Mathematics*. – 2013. – V. 57, Is. 1. – P. 1–11.
- [5] Rusanov M.S., Elfimova E.A., Zverev V.S. Dynamic magnetic susceptibility of a ferrofluid: The influence of interparticle interactions and ac field amplitude // *Physical Review E*. – 2021. – V. 104.

ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ФЛОТАЦИЮ КВАРЦА

Рыбкин К.А.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Кучинский М.О.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

k.rybkin@gmail.com, kat6chinskiy@gmail.com

Невозобновляемые природные ресурсы, минералы необходимы для широкого спектра биологических и технологических задач. Поверхностные взаимодействия минеральных частиц с другими объектами (например, твердыми телами, пузырьками, реагентами) в водных суспензиях играют решающую роль в обеспечении многих межфазных явлений, связанных с флотацией минералов [1].

Использование ультразвука при флотации оказывает значительное влияние на эффективность этого процесса [2]. Эффекты, возникающие при воздействии УЗ на флотационную пульпу, очень разнообразны. Например, появление в жидкости и на поверхности твердых тел кавитационных микропузырьков [3], устойчивых агломератов из воздушных пузырьков и твердых частиц, очистка твердых поверхностей от шламовых частиц и т.д. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении процессов, возникающих под действием УЗ во флотационной пульпе, и их влияния на кинетику флотации кварца.

Для регистрации пузырьков и частиц в экспериментах использовалась кювета, изготовленная из акрила. Генерация пузырьков осуществлялась при помощи асимметрично смачиваемой мелкопористой мембраны, погружного водяного насоса и воздушного компрессора. Для регистрации объектов использовались камера и источник контрольного света. Опыты по флотации кварцевого песка проводились на лабораторной флотационной машине ФМП-Л (ВЭКТИС минералз) с использованием собирателя dodecylamine hydrochloride (ДАН) различных концентраций и источника УЗ Vandelin HD 4200.

Эксперименты показали, что при интенсивном УЗ воздействии наблюдается образование пузырьковых кластеров. Низкая концентрация реагента во флотационной пульпе способствует закреплению отдельных частиц кварцевого песка на флотационном пузырьке; образование агломератов в этом случае не происходит. Увеличение концентрации ДАН способствует эффективному закреплению твердой частицы на пузырьке и образованию агломератов, состоящих из твердых частиц и пузырьков. В этом случае увеличивается как вероятность закрепления и удержания частиц на пузырьке, так и вероятность их совместного всплытия, поэтому процесс флотации становится значительно более эффективным.

Литература

- [1] Wang D., Liu Q. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review // Minerals Engineering. – 2021. – Т. 173. – С. 107220.
- [2] Chen Y. et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation // Ultrasonics sonochemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 104739.
- [3] Lyubimova T. et al. Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound // Ultrasonics. – 2021. – Т. 117. – С. 106516.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА МАГНИТНОЙ ПОЛИМЕРОСОМЫ НА ПРИЛОЖЕННОЕ НЕОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Рыжков А.В.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
ryzhkov.a@icmm.ru

Магнитные полимеросомы – субмикронные макромолекулярные контейнеры-везикулы с потенциалом использования в задачах медицинской диагностики и внутриклеточного транспорта биоактивных субстанций и лекарств [1]. Резервуар полимеросомы защищен амфифильным слоем, содержащим суперпарамагнитные наночастицы. Под воздействием внешнего магнитного поля взаимодействующие между собой и с полимерными стенками наночастицы способны выстраиваться в направленные структуры, что в стесненных условиях полимерной мембраны вызывает деформирование контейнера. Как результат, в магнитных полимеросомах может наблюдаться связанный магнитный, структурный и механический отклик на приложение внешнего магнитного поля различной конфигурации. В свою очередь, теоретические представления о предсказуемых свойствах и процессах, происходящих на уровне отдельной полимеросомной частицы, по-прежнему развиты слабо несмотря на чрезвычайную важность с точки зрения сценариев потенциального биомедицинского применения. Руководствуясь недавними успехами, достигнутыми с помощью математического моделирования объектов из мягкого магнитополимерного вещества, разрабатываемая модель крупнозернистой молекулярной динамики отдельной полимеросомы [2] впервые применяется для исследования конфигурации контейнера в приложенном неоднородном магнитном поле.

Магнитная полимеросома в модели представляется в виде набора полимерных и магнитных частиц, собранных в начальном состоянии в слоистую замкнутую оболочку с настраиваемыми геометрическими и структурными свойствами. Связи в системе описываются межчастичными потенциалами взаимодействия: упругие пружины «сшивают» полимерную мембрану; магнитные наночастицы взаимодействуют как точечные диполи; между частицами разных сортов также введены силы мягкого отталкивания. Конфигурация неоднородного магнитного поля создается введением в область моделирования вспомогательных частиц с фиксированным положением и ориентацией магнитного момента. Расчет по представленной модели осуществлен с помощью программного обеспечения ESPResSo [3]. В докладе планируется охарактеризовать итоговые состояния полимеросом в зависимости от конфигурации неоднородного поля и свойств магнитополимерного объекта.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации темы 122022800161-1.

Литература

- [1] Oliveira H. et al. Magnetic field triggered drug release from polymersomes for cancer therapeutics // J. Control. Release. – 2013. – Vol. 169. – P. 165–170.
- [2] Ryzhkov A. V., Raikher Y.L. Simulation of Shape and Structure Response of Nonspherical Magnetosensitive Vesicles Subjected to Magnetic Fields // IEEE Magn. Lett. – 2022. – Vol. 13. – P. 1–5.
- [3] Weik F. et al. ESPResSo 4.0 – an extensible software package for simulating soft matter systems // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2019. – Vol. 227. – P. 1789–1816.

ВЛИЯНИЕ ЛИБРАЦИЙ НА ТЕПЛОПЕРЕНОС ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ВОКРУГ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ ПЛОСКОМ СЛОЕ

Рысин К.Ю.

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермь
rysin@pspu.ru*

Подробно изучен случай, когда в системе отсчета полости вращается гравитационное поле в результате равномерного вращения самого слоя вокруг горизонтальной оси, ориентированной перпендикулярно его плоскости [1]. В такой постановке экспериментально обнаружено возбуждение осредненной тепловой конвекции в виде виброконвективных ячеек [2]. В допороговой области возникновения вибрационной конвекции обнаружено существование инерционных волн, генерируемых углами полости, образованными боковой и торцевыми поверхностями [3]. Текущее исследование направлено на изучение теплопереноса в вертикальном плоском слое с изотермическими вертикальными границами различной температуры в случае, когда слой совершает неравномерное вращение вокруг горизонтальной оси. Скорость вращения f_{rot} , частота f_{lib} и амплитуда либраций ε , толщина слоя h , разность температур границ слоя θ в экспериментах варьируются.

Исследования проводятся в области молекулярного теплопереноса (высоких значениях f_{rot}), развитие объемного течения происходит в результате генерации вибрационным образом (либрациями полости) осредненной конвекции. Обнаружено, что в условиях либрационного движения полости вблизи стенок формируются потоки, приводящие к интенсификации теплопереноса через слой. Даже при незначительном либрационном воздействии (при $\varepsilon \approx 0.15$) в слое на смену механическому равновесию приходит объемное осредненное движение жидкости. Показано, что при фиксированной скорости вращения f_{rot} и заданной частоте либраций полости f_{lib} повышение амплитуды либраций ε приводит к возрастанию теплопереноса в слое. С повышением скорости вращения полости кризис теплового потока происходит при меньшем значении амплитуды либраций полости. Интенсивность генерируемого течения зависит от взаимодействия скорости вращения и частоты либраций полости. Важную роль в исследуемом эффекте играет безразмерная частота осцилляций полости $N = f_{\text{lib}}/f_{\text{rot}}$. Во вращающихся системах либрационное воздействие может быть эффективно использовано для управления тепломассопереносом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-71-00086.

Литература

- [1] Kozlov V.G. Thermal Vibrational Convection in Rotating Cavities // J. Fluid Dynamics. 2004. V.39. P. 3–11.
- [2] Вяткин А. А., Иванова А. А., Козлов В. Г., Рысин К. Ю. Влияние тангенциальной составляющей силового поля на конвекцию во вращающемся плоском слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 215-222.
- [3] Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 304 с.

ДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ МАГНИТНОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А.

*Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия
r-piter@yandex.ru*

В данной работе предлагается новая методика создания активных пузырьков и капель с немагнитным ядром и покрытием, образованным магнитной жидкостью [1,2]. Гидродинамика данных систем рассмотрена в различных каналах при воздействии неоднородного магнитного поля. Магнитные жидкости являются коллоидным раствором наночастиц магнетика, покрытых поверхностно-активным веществом, диспергированных в жидкость-носитель

Процесс образования активных пузырьков и капель состоит во введении немагнитной фазы в магнитную, которая удерживается неоднородным магнитным полем комбинированного источника, объединяющего кольцевой магнит и электромагнит. Мы исследовали различные режимы, приводящие к различным активным пузырькам и каплям, также было исследовано влияние магнитного поля на размер, скорость и ускорение образующихся активных капель. Показано, что активные пузырьки меняют свою траекторию под действием постоянного магнитного поля, а также распадаются под действием импульсного. Это обеспечивает новый механизм управления каплями и пузырьками с помощью магнитного поля. В отличие от метода *flow focusing*, являющимся одним из основных методов в капельной микрофлюидике, отрыв немагнитных капель и пузырьков происходит не от капилляра, а от левитирующего немагнитного объема. В этом случае левитирующая газовая полость выступает в роли ресивера, позволяя стабилизировать размер отрывающихся пузырьков и увеличить диапазон регулировки в отличие от данной работы [3], в которой отрыв пузырьков в магнитной жидкости происходил в однородном магнитном поле.

Это создает предпосылки для разработки жидких многослойных капсул, управляемых магнитным полем, которые могут концентрироваться в определенном месте и разрушаться под импульсным воздействием. Полученные результаты могут быть применены для создания систем микрофлюидики на основе капель, в которых неоднородное магнитное поле может использоваться для фокусировки капельных и пузырьковых течений в магнитной жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-22-003113 <https://rscf.ru/project/22-22-00311/>

Литература

- [1] Sokolov, E.; Kaluzhnaya, D.; Shel'deshova, E.; Ryapolov, P. Formation and Behaviour of Active Droplets and Bubbles in a Magnetic Fluid in an Inhomogeneous Magnetic Field // *Fluids* – 2023. – V.8, №2.
- [2] Ryapolov P. A., Sokolov E. A., Postnikov E. B. Behavior of a gas bubble separating from a cavity formed in magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2022. – Т. 549. – С. 169067.
- [3] Yamasaki H. et al. Dynamic behavior of gas bubble detached from single orifice in magnetic fluid // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – Т. 501. – С. 166446.

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И НОРМАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МЕЖДУ ЖИДКОСТЬЮ И ГАЗОМ

Садилов Е.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
sadilove@icmm.ru

Изучается совместное влияние нормального электрического поля и нормальных вибраций на устойчивость основного состояния системы, состоящей из диэлектрических жидкости и газа, разделённых границей раздела, которая в основном состоянии является плоской и горизонтальной. Жидкость и газ представляют из себя слои бесконечной толщины. Газ расположен сверху, а жидкость — снизу. Жидкость считается несжимаемой. Газ же рассматривается, как несжимаемая жидкость с малыми в некотором смысле плотностью и вязкостью. Для исследования устойчивости основного состояния применяется метод многих масштабов. Чтобы описать вязкий пограничный слой, вводится быстрая вертикальная координата.

В данной задаче возможны два типа неустойчивости: неустойчивость типа неустойчивости Тонкса-Френкеля («электрическая» мода) и резонансная неустойчивость (резонансная мода). Во-первых, было изучено влияние вибраций на «электрическую» моду неустойчивости. Получена зависимость критического значения напряжённости электрического поля от амплитуды вибраций и волнового числа. Построены нейтральные кривые. Во-вторых, было изучено влияние электрического поля на резонансную моду неустойчивости. Изученный случай промежуточный между случаем со свободной границей [1] и случаем [2], когда жидкости имеют сравнимую плотность. Полученные формулы в некотором смысле интегрируют два этих случая.

Так же, как и в случае со свободной границей и случае со сравнимыми плотностями при некоторых значениях числа Вебера (пропорционального квадрату частоты вибраций) первая субгармоническая резонансная мода может иметь два или три минимума вместо одного (для остальных резонансных мод должно наблюдаться аналогичное явление).

В заключение можно заметить, что если вместо нижней диэлектрической жидкости рассмотреть проводящую жидкость, то результаты будут аналогичными, так же, как и в случае, когда нижняя жидкость будет магнитной, а вместо электрического поля будет рассмотрено магнитное поле.

Литература

- [1] Sadilov E.S. Joint influence of electric field and vibrations on the instability of fluid dielectric layer with free boundary // Journal of Physics: Conference Series – 2021. – Vol. 1809. – 012027.
[2] Садилов Е.С. Совместное влияние нормальных вибраций и электрического поля на устойчивость системы, состоящей из двух слоев жидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 288–302.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ВОЗДУШНЫЕ ПУЗЫРЬКИ В РАСТВОРАХ ПАВ

Садовникова А.Д.¹, Фаттахова И.А.¹, Рыбкин К.А.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

anastasiia3006@mail.ru, k.rybkin@gmail.com

Флотация руд представляет из себя довольно обширную область для исследований в связи с многопараметричностью происходящих процессов. Осуществляя контроль над характеристиками системы (размеры и количество пузырьков и твердых частиц, концентрация химических веществ в растворе и др.), можно добиться более высокой эффективности флотационного разделения различных твердых включений в жидкости.

Существует несколько способов генерации пузырьков, используемых при флотации, одним из которых является генерация пузырьков с помощью мембраны. Использование данного способа в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) позволяет регулировать размеры и количество воздушных пузырьков в широких диапазонах значений [1].

Использование ультразвука (УЗ) является одним из видов внешнего воздействия, способных положительно повлиять на флотационное разделение руд [2]. Существует ряд гипотез, объясняющих такое поведение, одна из них – образование кавитационных микропузырьков в жидкости, которые, участвуя в закреплении относительно крупных пузырьков на поверхности твердых частиц, могут оптимизировать процесс флотации [2].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании генерации воздушных пузырьков с помощью асимметрично смачиваемой мембраны в водных растворах ПАВ, изучении дрейфа пузырьков и агломератов и влияния ультразвука на данную систему.

В экспериментах использовалась лабораторная установка, включающая кювету из акрилового стекла толщиной 3 мм, асимметрично смачиваемую кварцевую мембрану с диаметром пор меньше 0,2 мм, воздушный компрессор и водяной насос, который создавал сдвиговый поток жидкости, срывающий с поверхности мембраны воздушные пузырьки. Эксперименты проводились с водными растворами ПАВ sodium dodecyl sulfate (SDS). Для регистрации пузырьков использовалась камера с контрольным источником света.

Проведенные исследования позволили определить зависимость диаметра и количества воздушных пузырьков, генерируемых вышеописанным способом, от концентрации SDS, а при фиксированной концентрации ПАВ от времени и режима УЗ воздействия. Изучен процесс дрейфа пузырьков и агломератов в водных растворах ПАВ при внешнем воздействии УЗ на систему.

Литература

- [1] Rybkin K. et al. Method of generation, measurement of the size and number of microbubbles in NaCl and SDS solutions of different concentrations //Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2317. – №. 1. – С. 012007.
[2] Chen Y. et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation // Ultrasonics sonochemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 104739.

ПОВЕДЕНИЕ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ

Сайдаков В.Д., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
imper2012@mail.ru, kozlov@pspu.ru

Экспериментально исследуется поведение двух жидкостей разной плотности в неравномерно вращающемся вертикальном щелевом зазоре с круговой границей. Вращение осуществляется по закону $\Omega = \Omega_{\text{rot}}(1 + \varepsilon \cos \Omega_L t)$, где Ω_{rot} – частота вращения, Ω_L – частота либрации, ε – безразмерная амплитуда либрации. В экспериментах варьируется ε при различных Ω_{rot} и Ω_L . Ранее эта задача рассматривалась в случае высокого контраста вязкости жидкостей в соотношении 1 к 310 [1]. Было обнаружено, что при неравномерном вращении на границе раздела жидкостей возникает рельеф под воздействием осцилляций маловязкой жидкости.

Задачей настоящего исследования является поведение двух жидкостей, вязкость которых отличается незначительно. Эксперименты выполнялись на паре жидкостей вода-индустриальное масло (И-20А) с соотношением вязкости 1 к 25. Обнаружено, что с увеличением амплитуды либраций более вязкая жидкость перераспределяется вдоль торцевой границы в виде тонкой пленки (рис. 1). При дальнейшем увеличении ε область смачивания теряет устойчивость, возникающая при этом структура потоков представлена на рисунке 1г.

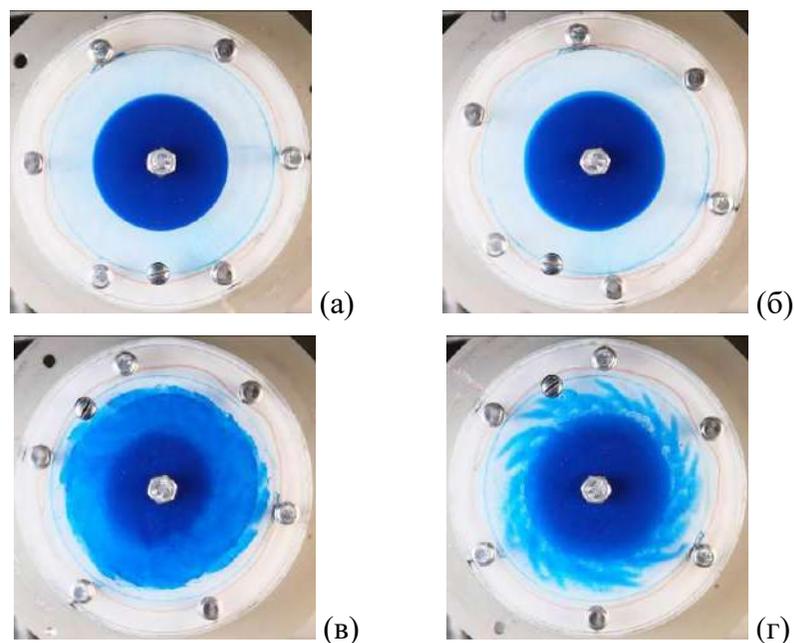


Рисунок 1 – Рельеф вязкой жидкости при $f_{\text{rot}} = 4$ Гц и $f_L = 3$ Гц; $\varepsilon = 0, 0.2, 0.44$ и 0.46 (а-г)

Исследования выполнены в широком диапазоне скоростей вращения, частот и амплитуд либраций. Построена физическая модель обнаруженного явления растекания вязкой жидкости вдоль торцевой стенки.

Литература

[1] Dementeva Y. S., Kobeleva V. S., Kozlov V. G. Experimental study of liquids interface oscillatory dynamics in rotating slot gap //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2317. – №. 1. – С. 012013.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА МНОГОСЛОЙНОЙ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Салихова Н.К.¹, Осколков А.А.², Келлер И.Э.^{1,2}, Трушников Д.Н.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
salikhova@icmm.ru, oskolkov.w@yandex.ru, kie@icmm.ru, trdimitr@yandex.ru

Технология аддитивного производства проволочно-дуговой наплавкой является высокоэффективным методом создания изделий, при котором последовательно наносятся слои расплавленного металла [1]. При таком технологическом способе производства изделий в объеме материала возникают большие градиенты температуры и остаточные напряжения, которые могут деформировать изделие и в дальнейшем привести к его разрушению [2]. С помощью методов компьютерного моделирования можно отработать режим аддитивного производства, обеспечивающий наилучшую структуру и повышенные прочностные характеристики синтезированной конструкции [3].

Настоящая работа посвящена определению параметров технологического режима многослойной проволочно-дуговой наплавки. Для этого сформулирована теплофизическая задача, описывающая распределение температуры, получаемое в результате теплового воздействия источника тепла в процессе послойного формирования (наплавления) изделия из алюминиево-магниевого сплава АМг5, учитывающая нелинейный характер тепловых потерь во внешнюю (окружающую) среду. Фронты плавления и кристаллизации не рассматривались. Учет теплового воздействия производится объемным источником теплоты с размерами $10,3 \times 10,3 \times 2$ мм. Наплавка проволочного материала осуществляется в несколько слоев по непрерывной траектории туда-обратно со скоростью 10 мм/с. Управляющей величиной является мощность источника теплоты, корректировка которой осуществляется с учетом позиционно-интегрирующего регулятора.

Задача теплопроводности при наплавке проволочного материала решена численно, с применением программного пакета Comsol Multiphysics[®]. Получены результаты вычислительных экспериментов по исследованию тепловых процессов, формированию сварочной ванны при действии объемного источника тепла, определены рациональные параметры, необходимые для устойчивого формирования послойного создания изделия. Установлено, что с течением времени с каждым следующим проходом источника тепла величина мощности сварки уменьшается и приобретает режим близкий к установившемуся. Проведенное численное моделирование процесса многослойной дуговой наплавки с учетом автоматического регулирования мощности сварки позволило минимизировать количество энергии вводимой в объем материала, обеспечивая оптимальные термические циклы и не допуская перегрева металла, влекущее расплавление наносимых слоев. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить равномерность структурного состояния наплавляемых слоев и получить однородное распределение механических свойств по всему сечению выращиваемого изделия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00715).

Литература

- [1] Wray P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out // Amer. Ceram. Soc. Bull. – Vol. 93, No. 3. – 2014. – P. 17-23.
- [2] Ma L., Bin H. Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – Vol. 34, No. 9. – 2007. – P. 898-903.
- [3] Салихова Н.К., Дудин Д.С., Келлер И.Э., Осколков А.А., Казанцев А.В., Трушников Д.Н. Моделирование рекристаллизации сплава АМг6 в прокованном слое при наплавке материала в процессе гибридного аддитивного производства // Вычислительная механика сплошных сред. – Т. 15, № 2. – 2022. – С. 234-246.

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА AL-SI НА ПОВЕРХНОСТИ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Самсонов Д.С., Груздь С.А.

Удмуртский государственный университет, Ижевск

mdhouse@bk.ru, lilyna@mail.ru

Эффект смачивания поверхности металлическим расплавом лежит в основе технических методов устранения мелких сколов и трещин при ремонте обшивки важных конструкционных изделий авиационной и космической промышленности. Подбор параметров при реализации указанного метода является одной из основных научно-технических проблем, требующих решения [1]. Рассмотрена задача заполнения трубки круглого сечения из алюминиевого сплава марки АД1 припоем из сплава Al–10 вес.%Si.

В начальный момент времени пруток припоя длиной 15,9 мм находится в твердом состоянии внутри стержня с внутренним диаметром 9,5 мм длиной 50 мм. В средней части стержня имеется алюминиевый вкладыш длиной 20 мм. За счет внешнего нагрева происходит плавление припоя и переход его в жидкую фазу. Капиллярные явления вызывают процесс смачивания стенок трубки, вследствие чего припой стекает по внутренней поверхности трубки и алюминиевого вкладыша. Задача рассматривается в неизотермической постановке, все свойства материалов и параметры системы являются функциями температуры.

Система уравнений включает в себя уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, а также уравнение баланса внутренней энергии. Отслеживание фазовой границы при плавлении припоя и смачивании им стенки трубки происходит с использованием ALE-метода подвижной границы с заданным углом смачивания [2]. Равновесный контактный угол со стенкой керамического стержня 150° с алюминиевым вкладышем 10° . Граничные условия третьего рода на внешней границе стержня описывают нагрев системы со скоростью изменения температуры окружающей среды 5 градусов в минуту.

В результате серии численных экспериментов исследуется динамика плавления припоя и стекание его вниз по внутренней поверхности стержня. Получены значения температурных полей в различные моменты времени. Построены графики изменения температуры образца и воздушной среды при нагреве и последующем охлаждении системы до момента установления равновесного положения расплава на поверхности стержня. Отмечается форма припоя на конце трубки при различных значениях уровня гравитации.

Литература

[1] Gruz S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S.D. Non-isothermal wetting of an Al alloy pin by Al-Si melt under terrestrial and microgravity conditions // *Microgravity Science and Technology*. – 2022. – V.34, N.4. DOI: 10.1007/s12217-022-09973-0.

[2] Груздь С.А., Кривилев М.Д., Самсонов Д.С. Математическая модель процесса смачивания вертикальной стенки при пайке твердым припоем сколов и трещин космических аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2022. – №2. – С. 66–74.

БИОМЕХАНИКА ЗУБОВ С КЛИНОВИДНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ДО И ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ

Сахабутдинова Л.Р., Аввакумов Д.А., Топорков А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
lyaysans@list.ru

Дефекты зубов вблизи шейки зуба были и остаются достаточно распространённой проблемой в клинической стоматологии. Выбор тактики лечения и реставрирующих материалов зависит от многих факторов: форма, глубина дефекта, характер его развития и т.д. При этом актуально биомеханическое моделирование поведения зубов с дефектами до и после реставрациями разными технологиями и материалами [1, 2]. Все чаще стоматологи нуждаются в эффективных численных инструментах для выбора протокола лечения. Для проведения численного анализа требуется разработка сложной геометрии зуба, корректная система граничных и начальных условий, а также знания о механических свойствах тканей и реставрационных материалов. Методы компьютерного инжиниринга и вычислительной биомеханики незаменимы при создании новых технологий реставрации [1] и анализе их влияния на деформирование зубов до апробации на практике с целью исключения врачебных ошибок и наработке данных о работе биомеханической системы. Численное моделирование актуально и при изучении влияния геометрии и глубины дефекта на напряженно-деформированное состояние зуба [2]. Так как биомеханическое моделирование зубов часто выполняется в сложных прикладных пакетах инженерного анализа, то существует проблема получения, обработки и анализа результатов стоматологами из-за сложности и дороговизны программного обеспечения. Таким образом, актуально создание специализированного информационно-аналитического программного обеспечения, которое позволит стоматологам эффективно работать с результатами исследования напряженно-деформированного состояния конструкций.

В данной работе предложен прикладной инструмент, который позволит проводить сравнительный анализ поведения зуба с заданными параметрами дефекта при различных вариантах формы и материала реставрации. В основе анализа лежат результаты численного моделирования. Разработана конечно-элементная модель зуба с дефектом. Предусмотрена параметризация ключевых размеров зуба и дефекта. Сформулирована система граничных и начальных условий на случай прямого взаимодействия с зубом-антагонистом. Проведено исследование влияния глубины и формы дефекта на напряженно-деформированное состояние зуба под действием внешней силы в заданном диапазоне значений. А также исследовано влияние нового типа реставрации дефекта с созданием протетической вкладки в первом приближении. Проведено исследование влияния материалов реставрации на поведение зуба. Реализована процедура автоматического формирования и сохранения результатов для каждого расчётного случая. В результате сформирован набор данных для проведения сравнительного анализа. На основе полученных данных о деформационном поведении зубов с различными видами реставраций разработан прототип прикладного инструмента, позволяющего визуализировать зависимости интенсивностей напряжений в тканях зуба для диапазона значений внешнего воздействия, распределения контактных параметров в зоне сопряжения реставрации и зуба в зависимости от материала реставрации.

Литература

- [1] Kamenskikh A.A., Sakhabutdinova L., Astashina N., Petrachev A., Nosov Yu. Numerical modeling of a new type of prosthetic restoration for non-carious cervical lesions // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 15. – Art. 5102.
- [2] Sakhabutdinova L., Kamenskikh A.A., Kuchumov A.G., Nosov Y., Baradina I. Numerical Study of the Mechanical Behaviour of Wedge-Shaped Defect Filling Materials // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 20. – Art. 7387.

ТЕРМОДИНАМИКА ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Свистков А.Л.¹

¹ИМСС УрО РАН, Пермь
sviskov@icmm.ru

Предложена новая модель вязкоупругого поведения эластомерных нанокompозитов, работающих в условиях конечных деформаций. Необходимость создания такой модели связана со следующими причинами. Существующие интегральные модели вязкоупругого поведения требуют для вычислений использования большого объема машинной памяти и высоких затрат машинного времени. Поэтому многие авторы предлагают различные варианты дифференциальных моделей, в основе которых лежит разложение Сидорова. Это мультипликативное разложение градиента деформации на упругий градиент, определяющий диссипативную часть тензора напряжений Коши, и вязкий градиент деформации. Аналогом такого разложения является разложение Ли, которое широко используется в теории упругопластического поведения материала. В таких дифференциальных моделях вязкоупругого поведения тензор скоростей деформации является ключевой величиной, с которой в конечном счете оказываются связаны диссипативные процессы в материале. Однако, чем больше становятся деформации материала, тем меньшее значение принимает тензор скоростей деформации при той же скорости перемещений границы материала. Это хорошо видно при попытке описать процесс одноосного нагружения образца при постоянной скорости движения захватов. Чтобы получить удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментальными данными приходится вводить в определяющие уравнения среды существенные нелинейные выражения.

В новой модели вязкоупругого поведения материала присутствует интеграл по времени только в выражении плотности свободной энергии. Остальные уравнения, с которыми в вычислительных экспериментах приходится иметь дело, являются дифференциальными. Скорость изменения диссипативной составляющей тензора напряжений Коши зависит от скорости изменения во времени правого тензора растяжений и от тензоров, определяющих поворот среды. Определяющие уравнения являются относительно простыми и верно отражают наблюдаемые явления в эластомерных нанокompозитах на уровне больших деформаций.

Новой идеей в модели является предложение учитывать эффект размягчения материала при первом деформировании (эффект Маллинза) не только в упругой составляющей тензора напряжений Коши, но и в диссипативной составляющей. Дано возможное обобщение модели на анизотропные среды.

Предложенная модель удовлетворяет требованиям объективности математического описания поведения деформируемой среды, гарантирует автоматическое удовлетворение первого закона термодинамики и второго закона, сформулированного в виде неравенства Клаузиуса-Дюгема. Рассмотрены особенности использования модели для анализа циклического деформирования рабочего элемента тепловой машины.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СТРОЯЩИХСЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Семин М.А.¹, Головатый И.И.², Левин Л.Ю.¹

¹Горный институт УрО РАН, Пермь

²ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь

seminma@inbox.ru, iwan15@yandex.by, aerolog_lev@mail.ru

Строительство подземных сооружений в обводненных грунтах и породах осуществляется с использованием специальных способов. Наиболее распространенным специальным способом строительства шахтных стволов калийных рудников является искусственное замораживание пород [1]. В рамках данного способа по контуру строящегося ствола устанавливаются замораживающие колонки, а в результате длительной циркуляции хладоносителя по системе замораживающих колонок формируется защитное ледопородное ограждение (ЛПО). ЛПО выполняет гидроизоляционную функцию, а также упрочняет стенки строящегося ствола до возведения бетонной крепи.

Основным параметром, определяющим состояние ЛПО, обычно является его толщина. Она определяется из расчетов по предельной прочности и предельной ползучести [2] в предположении однородного распределения прочностных и реологических свойств по объему ЛПО. Прочностные и реологические свойства пород определяются для некоторой фиксированной отрицательной температуры, обычно в интервале от -6 до -10 °С, что близко к средней температуре ЛПО на конец стадии активного замораживания пород. Однако в действительности существенно неоднородное поле температуры приводит к неоднородности распределений физико-механических, реологических и прочностных свойств замороженных пород [3]. В дополнение к этому, на протяжении «жизненного цикла» ЛПО распределение температуры в нем претерпевает существенные изменения, что также приводит к существенному изменению несущей способности ЛПО. Это не учитывается в применяемых сегодня критериях оценки состояния ЛПО.

В настоящем докладе проведен анализ существующих критериев оценки состояния ЛПО, показаны их недостатки, предложено несколько альтернативных вариантов и критериев оценки несущей способности ледопородных ограждений на основании анализа термомеханической задачи об искусственном замораживании пород в геометрически упрощенном осесимметричном случае. Полученные результаты окажутся полезными при разработке систем мониторинга и оперативного контроля состояния ЛПО при строительстве стволов шахт и рудников.

Литература

- [1] Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. –М.: Недра, 1984 г. – 238 с.
- [2] Вялов С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов, и расчеты ледогрунтовых ограждений. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 253 с.
- [3] Семин М.А., Бровка Г.П., Пугин А.В., Бублик С.А., Желнин М.С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // ГИАБ. – 2021. – № 9. – С. 79-93.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ДИФФУЗИИ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПАРКЕРОВСКОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Серенкова А.Ю.¹, Соколов Д.Д.^{1,2}, Юшков Е.В.^{1,2,3}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва

³Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

serenkova.ai19@physics.msu.ru

Модель динамо среднего поля описывает процессы генерации одновременно с осцилляционными процессами. При появлении периодического изменения параметров возможно появление параметрического резонанса [1], характер которого зависит от диссипативных слагаемых.

В данной работе исследуется модель Паркера [2], описывающая генерацию крупномасштабного магнитного поля Солнца. Она была получена из уравнения магнитной индукции, усреднённого по турбулентному зеркально-несимметричному потоку плазмы, соответствующему конвективной оболочке Солнца. Разделение магнитного поля на полоидальную и тороидальную компоненты позволяет записать это уравнение в виде системы двух уравнений в частных производных (по времени и по широтному углу), в каждом из которых за диссипацию отвечает число, пропорциональное отношению радиуса к толщине конвективной оболочки.

Одним из наиболее известных упрощений данной системы является так называемая маломодовая модель, в которой обе компоненты поля раскладываются по первым двум членам ряда Фурье по углу с учетом их симметрии относительно экватора. Это сводит задачу к системе из четырёх обыкновенных дифференциальных уравнений, которую также можно рассмотреть с точки зрения выделения резонансных эффектов. Оказывается, что при симметричных диссипативных слагаемых в системе наблюдается так называемый неизбирательный резонанс, отличительной чертой которого является отсутствие четко выделенного узкого максимума резонанса на кратных частотах. Для случая симметричной диссипации привычный резонансный пик все же наблюдается, но выглядит сложнее, чем ожидаемый для гармонических колебаний.

В рамках доклада мы отвечаем на следующий вопрос: как наличие и вид диссипативных слагаемых влияет на параметрический резонанс в системе Паркера.

Численный анализ параметрического резонанса в динамо-системах выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики (проект № 075-15-2019-1621). Асимптотический анализ периодического воздействия на генерацию крупномасштабных структур проводился при поддержке фонда БАЗИС (грант № 21-1-3-63-1).

Литература

[1] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики I. Механика. – М.: Наука, 1973.

[2] Parker E. N. Hydromagnetic Dynamo Models // *Astrophys. J.* – 1955. – V. 122. – P. 293.

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В КАЧЕСТВЕ ИНСТРУМЕНТА МОНИТОРИНГА ИЗДЕЛИЙ ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D ПЕЧАТИ

Сероваев Г.С.¹, Кошелева Н.А.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
serovaev@icmm.ru, kosheleva.n@icmm.ru

Перспективы использования различных термопластов, получаемых 3D печатью методом послойного наплавления, а также использование данных материалов для проектирования и изготовления различных конструкций и важных элементов инженерных сооружений, обуславливает необходимость исследования их механических характеристик и особенностей механического поведения при различных видах нагрузок: статических, динамических, ударных, длительного воздействия.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) имеют ряд достоинств, которые определяют целесообразность и перспективность их использования для измерения деформаций: они не чувствительны к электромагнитному воздействию, могут работать в широком диапазоне температур, имеются возможности по размещению множества ВОД на одной линии оптического волокна и одновременной регистрации показаний со всех датчиков на линии. Одним из основных достоинств ВОД является возможность их встраивания, благодаря малым размерам, в структуру контролируемого объекта на этапе изготовления по различным технологиям.

В настоящем исследовании представлен анализ экспериментальных результатов по регистрации деформаций точечными ВОД на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) и распределенными ВОД на основе обратного Рэлеевского рассеивания, встроенными или наклеенными на поверхность различных материалов, используемых в 3D печати. ВОД встраивались на этапе создания образцов, что позволило прописать всю эволюцию технологических деформаций. Продемонстрирована методика определения механических характеристик материалов (упругих постоянных изотропных материалов: модуля упругости и коэффициента Пуассона) при помощи ВОД. Получена количественная информация о вязкоупругом поведении аддитивных материалов (ползучести) с использованием ВОД на основе серии экспериментов, в которой реализуется четырехточечный изгиб.

Приведены результаты исследований по измерению деформаций в однородном и градиентном полях деформаций с помощью распределенных ВОД на основе Рэлеевского рассеяния и сопоставление результатов измерений с точечными датчиками на основе ВБР. Приведены результаты экспериментов при размещении волоконно-оптических датчиков на поверхности материала с помощью клеявого соединения и при встраивании оптического волокна в объем материала на этапе его изготовления. Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное совпадение значений деформаций, полученных при использовании точечных и распределенных ВОД. Для распределенного ВОД продемонстрировано влияние длины фрагмента профиля рассеяния, используемого для вычисления деформаций на качество измерения неоднородного распределения деформаций.

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Сероштанов В.В.^{1,2}, Маслов В. А.¹, Митяков В.Ю.^{1,2}, Сапожников С.З.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург

serosht_vv@spbstu.ru, vladislav.maslov.99@mail.ru, mitvlad@mail.ru, serg.sapozhnikov@mail.ru

Интенсификация теплообмена – распространенное направление исследований, обусловленное повышением эффективности теплообменников. Новые возможности дает совмещение градиентной теплотометрии и PIV [1]: возможно сопоставить картину течения с полем теплового потока. Градиентная теплотометрия основана на использовании градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), которые представляют собой объект с анизотропией тепло- и электрофизических свойств. При прохождении через них теплового потока Q , возникает поперечная разность температур ΔT_{\perp} и генерируется пропорциональная этой разности термоЭДС E , направленная по нормали к вектору теплового потока. Показаны результаты интенсификации теплообмена с помощью вихрегенераторов в классических задачах: при обтекании кругового цилиндра и пластины.

Экспериментальный стенд создан на основе аэродинамической трубы, в рабочей зоне которой располагается полую модель обтекаемого тела. Модель обогревается насыщенным водяным паром до температуры, близкой к 100 °С, а на ее поверхности устанавливаются ГДТП. Размеры и вольт-ваттная чувствительность используемых ГДТП составляют 2×2,5×0,2 мм и 4,6 мВ/Вт, соответственно.

В первой серии опытов исследован цилиндр с проволоками-турбулизаторами диаметром d_t , установленными параллельно образующим цилиндра и симметрично разнесенными относительно лобовой образующей на угол ψ_t . Диапазон исследуемых режимов охватывал числа Рейнольдса от 480 до 48000, и для каждого режима экспериментально определены оптимальные значения ψ_t . Средний по полуповерхности коэффициент теплоотдачи на 14 % выше по сравнению с цилиндром без турбулизаторов.

Во второй серии опытов исследовано обтекание овально-траншейной лунки (ОТЛ) [2] при различном угле наклона относительно вектора скорости набегающего потока и при различных режимах течения. Модель – ОТЛ диаметром $D = 64$ мм, глубиной $0,157D$ и относительным удлинением цилиндрической части $S = 3D$. Экспериментально получены распределения местного числа Нуссельта для трех сечений: средние продольное и поперечное, а также переходное сечение между сферической и цилиндрической частью ОТЛ. Установлено, что в поперечном сечении максимум теплового находится на наветренной стороне ОТЛ и превышает значения на входе в лунку в 1,5...2,3 раза. Выявлена зависимость интенсивности теплоотдачи от угла наклона ϕ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-19-00056).

Литература

- [1] А. А. Гусаков, М. А. Греков, В. В. Сероштанов. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2018. – Т. 11. – № 2. – С. 151-164. – DOI 10.18721/JPM.11214.
- [2] С. А. Исаев. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях. Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – № 5. – С. 13-24. – DOI 10.31857/S0568528122050085.

ТЕЧЕНИЕ СУСПЕНЗИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ С ПОРИСТЫМИ СТЕНКАМИ

Скульский О.И.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
skul@icmm.ru*

Целью данного исследования является построение численной модели течения суспензии с неоднородным распределением концентрации твердых частиц в плоской щели с оттоком дисперсионной фазы через пористые стенки. Отличительной особенностью концентрированной суспензии является увеличение эффективной вязкости с ростом концентрации твердых частиц и непрерывное или скачкообразное увеличение напряжений с ростом скорости сдвига. Для учета неньютоновских свойств дисперсионной среды предложена новая реологическая модель.

Течения концентрированных суспензий твердых частиц с неньютоновской дисперсионной фазой описываются системой дифференциальных уравнений, отражающих законы сохранения импульса и массы. Скорость оттока жидкости через пористые стенки канала определяются по закону Дарси, скорость оседания частиц определяется по формуле Стокса.

Считается, что в начальный момент времени щель полностью заполнена чистой неньютоновской жидкостью. При под заданным давлением на входе подается суспензия с начальной концентрацией твердых частиц. Через окружающую щель пористую среду происходит отток дисперсионной фазы. При этом локальное давление и расход нелинейно уменьшаются по длине. Тяжелые частицы дисперсной фазы продвигаются конвективно-диффузионным потоком вдоль канала и частично оседают под действием гравитации.

Приведен пример расчета методом конечных элементов процесса транспортировки твердых частиц в плоской щели с оттоком дисперсионной фазы через пористые стенки. В результате показано, что концентрация частиц в канале постепенно повышается со временем. В конце концов, расход поступающей на вход дисперсионной фазы суспензии сравнивается с общим расходом утечек, что определяет предельную длину заполнения канала частицами.

АППРОКСИМАЦИЯ В ANSYS MECHANICAL ТЕРМОВЯЗКОУПРУГО ПОВЕДЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО КОМПОЗИТА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ PRONY

Сметанников О.Ю., Сахабутдинова Л.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
lyaysans@list.ru

При моделировании поведения конструкций из анизотропных композиционных материалов при длительных процессах сопряженных внешними силовыми и температурными воздействиями все чаще требуется учет реологического поведения компонент или материала в целом. Существующие коммерческие пакеты конечно-элементного моделирования на данном этапе развития не позволяют учитывать вязкоупругость всех ядер релаксации анизотропных материалов. Кроме этого, отдельно стоит отметить сложность получения вязкоупругих свойств экспериментальными методами. В связи с этим актуальными проблемами остаются прогнозирование анизотропных свойств композиционных материалов и их аппроксимация для проведения исследований поведения конструкций.

Общее направление исследования направлено на прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкции, состоящей из слоистой композиционной оболочки и технологической оснастки, на протяжении процессов намотки оболочки и полимеризации связующего. Одной из задач стоит проблема корректного описания термовязкоупругого поведения оболочки.

На первом этапе решения задачи прогнозируются функции релаксации для слоистого композиционного материала, получаемого методом мокрой намотки. В работе использован методом многоуровневого моделирования. На первом уровне рассмотрена релаксация в двух направлениях для ячейки периодичности одного слоя. Используются результаты экспериментального исследования на продольную релаксацию связующего материала и кольцевых образцов пластика. На втором уровне рассмотрен представительный объем материала, с помощью метода переменных параметров упругости построены функции релаксации в трех ортогональных направлениях.

На втором этапе реализована процедура аппроксимации каждой функции релаксации с помощью рядов PRONY. С помощью ANSYS Mechanical осуществлена количественная оценка влияния выбора аппроксимированного ядра на релаксацию представительного объема материала при постоянной температуре в трех направлениях. Установлено что минимальную погрешность наблюдается при использовании аппроксимации продольной (вдоль волокон) функции релаксации. Затем проведено аналогичное исследование на представительном объеме конструкции под действием начальных усилий при постоянной температуре. Установлено что использование аппроксимации продольной функции релаксации слоистого композиционного материала вносит наименьшую погрешность в напряженно-деформированное состояние конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

[1] Сахабутдинова Л.Р., Сметанников О.Ю., Ильиных Г.В. Численное моделирование процесса изготовления крупногабаритного композитного кокона с учетом термовязкоупругости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – №76.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА СЕТКИ И МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗАДАЧИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Смолянов И.А.¹, Шмаков Е.И.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург
i.a.smolyanov@gmail.com

Исследование структуры потока жидкости в каналах под воздействием внешнего магнитного поля является актуальной задачей для развития систем охлаждения ядерных реакторов, решения ряда проблем в термоядерном синтезе, совершенствования теории проектирования электромагнитных насосов и модернизации технологических процессов в металлургии. Задача протекания потока жидкости в канале под воздействием внешнего магнитного поля в безразмерном виде позволяет обобщить множество технических объектов исследования, например индукционный насос [1]. Одно из важных исследований в этой задаче это повышение точности прогнозирования наступления неустойчивости потока жидкости.

Исследование потока жидкости с помощью натурального эксперимента является сложной задачей из-за особенностей методов измерения физических величин в жидких средах. Измерение интегральных параметров потока жидкости реализуется часто во многих реальных технических объектах, но данные измерения во многих случаях не дают полную картину понимания образующихся вихрей. Для этих целей необходимо уметь анализировать распределенные параметры потока. Численное моделирование позволяет проводить такие эксперименты и получать локальные распределения физических параметров или наблюдать структуры вихрей. Стоит отметить, что результаты численного моделирования зависят от адекватности постановки задачи и настройки модели.

В данной работе рассматриваются особенности настройки сетки для численного расчета потока жидкости в прямоугольных каналах под воздействием магнитного поля для моделей турбулентности различных модификаций LES, $k - \omega$ и $k - \epsilon$. Результаты представлены с точки зрения влияния размера сетки и модели турбулентности на разрешения вихрей в различных областях (Рисунок 1). Приводятся рекомендации по адаптации численных моделей для частных случаев на основании предложенных в работе количественных критериев.

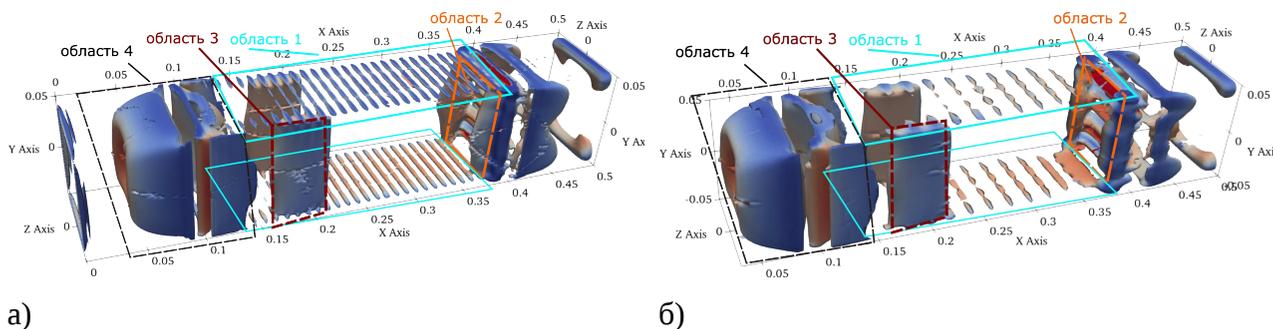


Рис. 1. Контуры значения Q-критерия, размеченные по модулю скорости потока жидкости рассчитанные с помощью моделей турбулентности а) LES и б) $k - \omega - SST$

Литература

[1] Smolyanov I., Shmakov E., Baake E., Guglielmi M. Verification of the code to calculate dyct flow affected by external magnetic field, Computational Continuum Mechanics, 2021, vol. 14, no. 3 pp. 322-332

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ В КОЛЛОИДНОЙ СУСПЕНЗИИ, ЗАПОЛНЯЮЩЕЙ ЗАМКНУТУЮ ЯЧЕЙКУ

Сморозин Б.Л.¹, Тараут А.В.²

¹Пермский государственный университет, Пермь

²Институт Развития Образования Пермского края, Пермь

bsmorodin@yandex.ru, taraut@kraioko.perm.ru

Исследована возможность существования локализованных бегущих волн (LTW, localized traveling wave) коллоидной суспензии в замкнутой вытянутой по горизонтали полости при подогреве снизу. На колебательную конвекцию влияют эффекты переноса примеси за счет конвекции, аномальной термодиффузии и гравитационной стратификации в коллоидной смеси. Значения безразмерных параметров задачи при численном моделировании методом конечных разностей соответствуют коллоидной суспензии Nuflon MFA [1]: число Льюиса $Le = 8,84 \cdot 10^{-5}$, параметр разделения смеси $\psi = -7.5$, число Прандтля $Pr = 6.0$, число Больцмана $B = 1.12 \cdot 10^4$. Безразмерная седиментационная длина – $l_{sed} = 3.5$. Аспектное соотношение (отношение длины к высоте слоя) $L = 8$.

Изучена эволюция LTW и получена зависимость времени ее жизни от числа Релея (рис. 1). Удалось обнаружить только переходные (неустойчивые) режимы LTW, которые существуют в интервале чисел Релея $2600 < R < 3800$ и быстро разрушаются при более интенсивных нагревах.

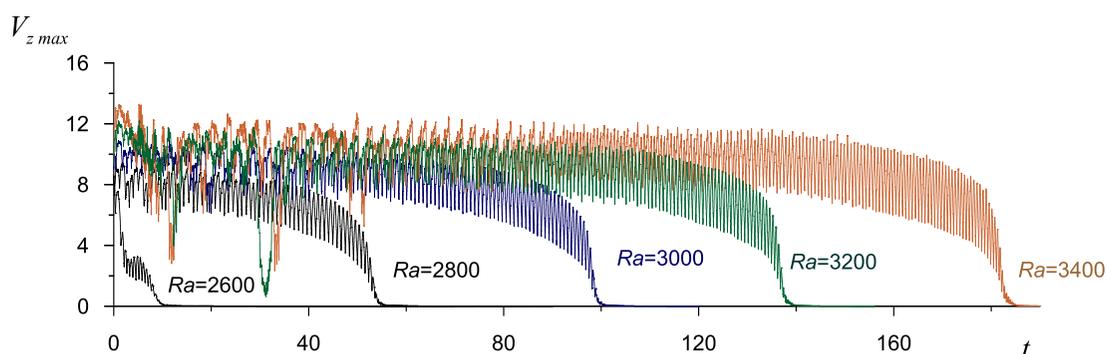


Рис. 1. Эволюция максимального значения вертикальной компоненты скорости V_z в режиме локализованной бегущей волны (LTW) для нескольких значений числа Релея.

Отсутствие устойчивого режима LTW в коллоидной суспензии может быть связано, со следующим обстоятельством. В молекулярной смеси на бифуркационной диаграмме LTW располагается в области конвективной неустойчивости механического равновесия, когда имеется перенос возмущений из области неподвижной жидкости, окружающей LTW, внутрь дрейфующей конвективной структуры. Рассматриваемые нами конвективные структуры в коллоидной суспензии с большим отрицательным параметром разделения смеси существуют не благодаря неустойчивости механического равновесия (оно в этом случае устойчиво), а вследствие с искажения поля концентрации вблизи горизонтальных стенок кюветы. В случае создания начального состояния в виде локализованной конвекции в части ячейки (вдали от одной из стенок), искажение поля концентрации вблизи нее не происходит. Дальнейшая эволюция поля концентрации приводит к уменьшению длины LTW и ее разрушению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-01-00491).

Литература

[1] Donzelli G., Cerbino R., Vailati A. Bistable Heat Transfer in a Nanofluid. Phys. Rev. Lett. 2009, **102**, 104503.

ИЗУЧЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КАК РЕЗУЛЬТАТА ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

Соковиков М.А.¹, Симонов М.Ю.², Чудинов В.В.¹, Оборин В.А.¹,
Уваров С.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
sokovikov@icmm.ru

Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона - Кольского и при пробивании преград. Температурные поля в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Осуществлены динамические испытания образцов на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского с применением DIC технологии.

Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа, показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов [1-7].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041).

Литература

- [1] Соковиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. –Т.40, В. 23. – С.82 - 88.
- [2] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. –№ 5. – С. 43-47.
- [3] Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 3. – С.301-312.
- [4] Билалов Д.А., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Описание эффекта падения прочности сплава АМг6 с ростом температуры при динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 5. – С.5-14.
- [5] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Билалов Д.А., Ю.Н. Симонов Ю.Н., Наймарк О.Б. Локализация пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 45–57.
- [6] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение разрушения локализованным сдвигом сплава АМг6 при статическом и динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. . – С. 300-311.
- [7] Соковиков М.А., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование локализации пластической деформации в сплаве АМг6 при различных видах динамического воздействия // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – №3. . – С.154-162.

РАСШИФРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ЗОНДА АСМ В НАПОЛНЕННЫЙ ЭЛАСТОМЕР С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОСЕТИ

Соколов А.К., Гаришин О.К., Свистков А.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Aleksandr_Sokol@mail.ru

В экспериментальных исследованиях эластомерных композитов на наноуровне одним из наиболее перспективных инструментов является атомно-силовая микроскопия (АСМ). С ее помощью можно исследовать не только морфологию структуры материала, но и его "локальные" физико-механические свойства. Для расшифровки этих экспериментальных данных требуется создание компьютерной модели на основе решения соответствующих краевых задач об индентировании зонда АСМ в поверхность образца, то есть очень значительных компьютерных вычислений [1].

Данный подход усложняется тем, что для ввода в модель новых данных ее каждый раз приходится полностью перестраивать (что весьма трудоемко и малоэффективно). Оптимальным выходом из этой ситуации является использование искусственных нейронных сетей. Это самообучающиеся математические модели, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей [2]. Нейросетевые программные комплексы способны не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий над заранее определенными данными, но и могут "самостоятельно" анализировать вновь поступающую информацию, находить в ней закономерности, производить прогнозирование и т.д.

В работе описан способ применения искусственных нейронных сетей для построения компьютерной базы данных по численному моделированию процесса индентирования зонда АСМ в эластомерный композит с зернистым наполнителем (нелинейно-упругая конечно-деформируемая среда). Использование нейросети позволяет намного улучшить скорость и качество расшифровки результатов наноиндентирования для структурно-неоднородных материалов. При этом становится доступной информация о том, что происходит на поверхности образца, и в приповерхностном слое.

Разработан алгоритм, с помощью которого была построена и "обучена" искусственная нейросеть, описывающая кривые индентирования в зависимости от размера частиц наполнителя и ее локализации в приповерхностном слое композита (глубина и горизонтальное удаление от вершины зонда АСМ). Показано что скорость построения индентационных кривых возрастает на несколько порядков по сравнению с обычными подходами, основанными на численном решении соответствующих краевых задач для каждого конкретного случая. Соответственно значительно уменьшаются и компьютерные затраты, то есть при наличии уже построенной и "обученной" нейросети не нужны мощные и скоростные компьютеры.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7 (2020)

Литература

- [1] Garcia R. Nanomechanical mapping of soft materials with the atomic force microscope: methods, theory and applications // Chem. Soc. Rev. – 2020. – V. 49. – P. 5850-5884.
- [2] Rosetblatt F. Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms. – Spartan books, 1962. – 616 p.

АНАЛИЗ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ СОЛЯНОЙ ПОРОДЫ

Соколов А.С.¹, Пантелеев И.А.², Барях А.А.¹

¹Горный институт УрО РАН, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Sokolov.Alex@mi-perm.ru, pia@icmm.ru, bar@mi-perm.ru

Экспериментальные исследования деформационного поведения образцов соляных пород Верхнекамского месторождения при различных видах нагружения показывают на значительную вариацию их механических свойств, даже изготовленных из одного монолита. Причины такого разброса связаны с неоднородностью состава, размером зерна, разномасштабной дефектностью.

Целью данных исследований являлся анализ возможностей использования метода рентгеновской микротомографии для качественного и количественного описания внутренней структуры соляных пород и ее изменения в процессе одноосного нагружения. Метод микротомографии позволяет воссоздать трехмерную модель образца по томографическим срезам, выделить отдельные дефекты (поры, трещины, каверны) оценить их объем и геометрию, определить пространственное положение минеральных фаз.

Исследования проводились на 5-ти кубических образцах красного сильвинита с размером ребра 22 мм. Нагружение образцов выполнялось на жестком электромеханическом прессе Zwick/ Z250 с предельной нагрузкой 25 тонн. Испытания на одноосное сжатие осуществлялись в режиме «нагрузка-разгрузка» последовательно начиная с напряжения 2 МПа с шагом 2 МПа. После разгрузки все образцы подвергались микротомографическим исследованиям.

По результатам рентгеновской микротомографии производилась количественная оценка дефектной структуры образцов красного сильвинита. Для каждой несплошности определялись следующие параметры: объем, коэффициент сферичности, максимальный линейный размер (расстояние между двумя точками, которые находятся на максимальном удалении друг от друга). Кроме того, для всех образцов рассчитывалось объемное содержание несплошностей после каждого блока нагружения. По кривым нагружения каждого образца оценивались модуль деформации, модуль упругости и остаточная деформация.

В результате проведенного исследования показано, что использование метода рентгеновской микротомографии позволяет количественно охарактеризовать внутреннюю дефектную структуру образцов соляных пород, а также проследить за ее эволюцией в процессе их ступенчатого одноосного нагружения. Установлено, что деградация механических свойств образцов сильвинита строго коррелирует с изменениями параметров их дефектной подсистемы. На основе статистического анализа выявлены новые закономерности изменения количественных параметров дефектной структуры образцов с ростом приложенного напряжения.

КАК ЭКЗОПЛАНЕТЫ МОГУТ ПОМОЧЬ ПОНЯТЬ РАБОТУ ДИНАМО

Соколов Д.Д.

¹*МГУ, Москва*

²*ИЗМИРАН, Москва*

sokoloff.dd@gmail.com

Одним из важнейших достижений современной астрономии явилось наблюдательное обнаружение планетных систем у многих звезд. Конечно, и раньше естественно было полагать, что планеты Солнечной системы не являются каким-то исключением, однако теперь это общее соображение стало конкретным. Некоторое время казалось достаточным просто наращивать список известных экзопланет и заниматься его первоначальным структурированием. Однако со временем стало понятно, что наблюдение экзопланет и накопление информации о них позволяет по новому взглянуть на известные проблемы генерации магнитных полей в Земле и на Солнце. В докладе рассказывается о некоторых работах в этом направлении.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Соломонов Д.Г., Нихамкин М.Ш., Саженов Н.А., Конев И.П.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
solomonov1198@yandex.ru*

В авиационных конструкциях для изготовления ответственных деталей и узлов, работающих в условиях циклического нагружения, все более широкое применение получают полимерные композиционные материалы (ПКМ); необходимо обеспечивать их усталостную прочность [1, 2]. Для этого недостаточно экспериментальных данных, получаемых при усталостных испытаниях стандартных образцов, когда определяются характеристики материала с конкретной схемой армирования и технологией изготовления. Они не дают необходимого понимания процессов разрушения реальной конструкции [3,4]. В дополнение к ним необходимо проведение испытаний образцов критических зон – конструктивно-подобных элементов (КПЭ), которые сохраняют конструктивные и технологические особенности деталей. Получаемые при этом экспериментальные данные необходимы для более полного понимания процесса накопления усталостных повреждений и разработки математических моделей.

Объектом проведенного исследования является типовая деталь авиационного назначения из слоистого углепластика [5], имеющая фланцы и ребра жесткости. Целью работы является исследование закономерностей усталостного разрушения ее критических зон.

В работе обоснован выбор формы и схемы нагружения КПЭ. Отработана методика и проведены их усталостные испытания. Испытания проводились на экспериментальной установке на базе вибростенда. Для проведения испытаний разработаны схемы нагружения, которые позволили воспроизвести закономерности напряженно-деформированного состояния детали в эксплуатации. В процессе испытаний контролировалось виброускорение стола вибростенда, деформации и перемещения в контрольных точках КПЭ, поля температур.

В результате испытаний получены кривые усталости КПЭ. Исследованы закономерности снижения жесткости и падения резонансной частоты с усталостной наработкой. Получены поля температур КПЭ на разных этапах разрушения. Характерным механизмом усталостного разрушения КПЭ являются расслоения. Получены данные об их зарождении и развитии.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке типовых авиационных конструкций из ПКМ, а также для отработки математических моделей прогнозирования их усталостного ресурса.

Литература

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Серия: Газотурбинные двигатели т.2. Учебник. – М., Машиностроение, 2008. – 368 с.
- [2] Kelly A. The engineering triumph of carbon fiber // Composites and nanostructures. – 2009. – №1. – P. 38 – 49.
- [3] Nikhamkin M.Sh., Sememnov S.V., Silberschmidt V.V., Solomonov D.G. Identification of elastic parameters of laminated carbon fiber plates using experimental modal analysis // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – V.14, № 12. – P.2279 – 2285.
- [4] Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G. Change of the elastic characteristics of a fiber-reinforced laminate as a result of progressive fatigue damage // Solid State Phenomena. – 2021. – V. 316. – P. 955-960.
- [5] Соломонов Д.Г., Нихамкин М.Ш., Торопицина А.В. Выбор конструктивно-подобных элементов для испытаний на усталость авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 62–70. DOI:10.15593/2224-9982/2022.69.07

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ И ПОСЛЕДУЮЩИХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Староверов О.А., Мельникова В.А., Мугатаров А.И., Чеботарёва Е.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
sem_staroverov@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению деформирования и разрушения, а также перехода к критическим состояниям конструкционных слоисто-волоконистых полимерных композитов в условиях комплексных низкоскоростных ударных, циклических и квазистатических воздействий. По разработанной ранее авторами методике проведена оценка влияния предварительного низкоскоростного удара падающим грузом на остаточную несущую способность и усталостную долговечность композиционных слоисто-волоконистых углепластиков с перекрестной схемой армирования [1-4]. Получены экспериментальные данные, отражающие стадийный характер изменения остаточной прочности и усталостной долговечности исследуемых композитов. Определены пороговые значения относительной энергии воздействия, соответствующее началу повышения чувствительности композита к удару. Выполнено изучение процессов накопления повреждений и разрушения в условиях предварительного ударного и последующего статического и циклического изгиба на основе использования систем регистрации сигналов акустической эмиссии Amsy-6, полей перемещений VIC 3D и ультразвукового контроля Harfang VEO на фазированных решетках. Результаты УЗК показали хорошую корреляцию с данными распределения полей перемещений и деформаций в опытах на квазистатический сдвиг. При анализе акустического отклика отмечено влияние предварительного ударного воздействия с различной интенсивностью на распределение диапазонов частот регистрируемых сигналов, соответствующие различным механизмам разрушения композитов. Выявлено изменение распределения энергетического параметра и куммулятивной энергии в опытах на квазистатический и циклический изгиб после удара.

Экспериментальное исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (Грант МК-1545.2022.4).

Литература

- [1] Staroverov O., Lobanov D., Strungar E., Lunegova E. Evaluation of the influence of preliminary low-velocity impacts on the residual fatigue life of CFRP composites. International Journal of Structural Integrity. ISSN 17579864. DOI:10.1108/IJSI-04-2022-0056.
- [2] Staroverov O.A., Mugatarov A.I., Yankin A.S., Wildemann V.E. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions. Frattura ed Integrità Strutturale. 2023. Vol. XVII. Iss. 63. DOI:10.3221/IGF-ESIS.63.09.
- [3] Strungar E.M., Staroverov O.A., Lynegova E.M. Comprehensive evaluation of fatigue damage accumulation and failure of specimens with operational stress concentrators. Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2022-08. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.037-049.
- [4] Wil'deman V.E., Staroverov O.A., Lobanov D.S. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered GFRP composites after preliminary cyclic loadings. Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54, № 3. – P. 313-320.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА NCEP-CFSR

Степанов Р.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rodion@icmm.ru

Турбулентная конвекция в атмосферном слое Земли может проявлять спектральные свойства, характерные для двумерной, трехмерной или геострофической турбулентности. Имеются различные теории, объясняющие наблюдаемое изменение спектрального индекса энергии пульсаций скорости ветра на мезомасштабах порядка 500 км. Среди всех факторов, влияющих на динамику атмосферных течений, взаимодействие структур поля скорости различных масштабов играет одну из ключевых ролей. Однако решение проблемы теоретического описания спектрального переноса, которое бы принимало во внимание все особенности структуры атмосферной турбулентности, до сих пор не найдено. В данной работе сделана попытка выделить эти особенности с использованием глобальных данных реанализа NCEP-CFSR о состоянии атмосферы с 1979 по 2022 год. В работе решается задача нахождения энергии флуктуаций поля скорости на различных масштабах. Для сравнения были использованы два подхода. В первом подходе применяется разложение по сферическим гармоникам, а втором - непрерывное двумерное вейвлет-преобразование. Было показано, что интегральные спектры, полученные двумя подходами, совпадают, но в диапазоне масштабов 400-600 км и менее начинает проявляться сильная широтная зависимость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-61-00098).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ОБЪЕМЕ

Степанов Р.А.¹, Васильев А.Ю.¹, Сухановский А.Н.¹, Кузанын К.М.^{1,2}, Клиорин Н.И.^{1,3}

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва*

³*Ben-Gurion University of the Negev Beer-Sheva Israel*
rodion@icmm.ru

Сегодня наиболее широко используемой математической моделью солнечной активности, позволяющей с той или иной точностью предсказывать длительность солнечного цикла, является теория гидромагнитного динамо и ее различные модификации. Анализ результатов, полученных с помощью данных моделей, показывает, что на интервалах длительностью от нескольких лет до нескольких десятилетий они лишь частично описывают как регулярную, так и **хаотическую** динамику солнечной активности. Данная работа является частью проекта, направленного на уточнение моделей динамо среднего поля в части описания эффектов турбулентности. Для этого были численно и экспериментально изучены свойства конвективной турбулентности в прямоугольной области при числах Релея от 10^8 до 10^9 и числе Прандтля $Pr=6.1$ в условиях, когда нижняя граница однородно нагревается, а верхняя является свободной, что обеспечивает квазистационарный отток тепла. Рассматривались два варианта аспектного отношения рабочей области: 2:1:1 характеризуется наличием выраженной устойчивой крупномасштабной циркуляции и 4:4:1 обеспечивает ансамбль квазистационарных конвективных ячеек.

Были получены спектральные и корреляционные свойства турбулентного поля, на основе которых удалось оценить применимость общих теоретических представлений, используемых для замыкания моделей динамо. Эксперимент, в отличие от расчетов, позволяет проводить длительные серии измерений, что является ключевым фактором, обеспечивающим накопление статистических данных. В то же время в некотором диапазоне умеренных чисел Рейнольдса результаты численного и лабораторного экспериментов могут перекрываться, что дает возможность разрешить некоторые трудности проведения лабораторных измерений трехмерных полей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20067).

СОГЛАСОВАННОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНГЛИИ И ГРЕНЛАНДИИ

Степанов Р.А.¹, Соколов Д.Д.², Фрик П.Г.¹

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Московский государственный университет, Москва*

rodion@icmm.ru, frick@icmm.ru

Проведен анализ характерных изменений в изотопных данных о температуре в Гренландии за последние 1000 лет [1]. и в метеорологических измерениях температуры в Центральной Англии за последние четыре столетия [2]. Выделение разномасштабных трендов в данных [2] было проведено ранее в работе [3]. Мы провели анализ этих данных современными методами вейвлет-анализа [4] в сопоставлении с данными, полученными в достаточно удаленной области северного полушария. Основное внимание уделено похолоданию на рубеже XVIII века и потеплению, наблюдаемому в настоящее время.

Помасштабный анализ изменчивости температуры в центральной Англии и Гренландии указывает, что вариации температуры в этих регионах Земли определяется множеством факторов, и включает широкий диапазон характерных времен. Далеко не все факторы, определяющие температуру двух регионов связаны друг с другом. В частности, если спектр вариаций температуры льдов имеет максимумы на 30 и 70 годах, то спектр английских температур почти плоский. Помасштабный корреляционный анализ показывает, что пик корреляции приходится на вариации со временем порядка 60 лет, а 30-летний пик, получаемый по льдам Гренландии никак не связан с факторами, влияющими на Англию.

Любопытно, что 11-летние колебания, которые можно было бы попытаться связать с влиянием солнечной активности, не проявляют себе в спектрах колебаний ни в одном сигнале, но видны в спектре кросс-корреляций. Имеющиеся данные не позволяют обсуждать корреляции на характерных временах более 100 лет в силу недостаточной статистики. Что касается Малого ледникового периода, то в форме действительно выраженного похолодания он проявляется только при отсечении всех вариаций с характерным временем менее века. При такой фильтрации видно как понижение температуры в начале 18 века, так и современное повышение температуры. Похолодание на рубеже XVII--XVIII в. охватило значительную часть Земли. В этом смысле оно сопоставимо с современным глобальным потеплением. В то же время между этими событиями видны и существенные отличия. Так, похолодание в Гренландии происходило заметно позже, чем в центральной Англии, в то время как современное потепление происходит в обоих регионах согласованно.

Работа выполнена за счет проекта РНФ 22-61-00098.

Литература

- [1] Meese D., Cow A. J., Alley R. B. e. a. The Greenland ice sheet project 2 depth-age scale // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. V. 102, no. C12. P. 26411.
- [2] Manley G. Central England temperatures: Monthly means 1659 to 1973 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1974. V. 100, no. 425. P. 389–405.
- [3] Baliunas S., Frick P., Sokoloff D., Soon W. Time scales and trends in the central England temperature data (1659-1990): A wavelet analysis // *Geophysical Research Letters*, 1997. V.24, no.11. P.1351–1354.
- [4] Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Степанов Р.А. Вейвлет-анализ пространственно-временной структуры физических полей // *Успехи физических наук*. 2021. Т.192, No 1. С.69–99.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Степанова Л.В., Анисимов Г.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара

stepanova.lv@ssau.ru, anisgennady@gmail.com

В работе с помощью метода голографической интерферометрии [1,2] вычислены коэффициенты интенсивности напряжений, Т-напряжения и коэффициенты слагаемых более высокого порядка малости в асимптотическом представлении М. Уильямса полей, ассоциированных с вершиной трещины. Для экспериментального определения параметров механики разрушения был проведен анализ существующих методов голографической интерферометрии, изготовлен широкий ряд экспериментальных образцов из оптически активных материалов, собрана рабочая схема поляризационно-голографической установки, при помощи которой были получены интерференционные картины полос изодром для 1) тарировочных дисков, сжатых диаметрально противоположно направленными сосредоточенными силами; 2) для образцов с центральной горизонтальной трещиной при действии растягивающей нагрузки; 3) для пластин с центральной наклонной под разными углами трещиной при действии растягивающей нагрузки различной амплитуды (рис.1). С помощью процедуры тарировки определены оптические постоянные материала закона Фавра [1,2]. Для целостного описания полей у вершины трещины применялось многопараметрическое разложение М. Уильямса. С помощью переопределенного метода [3], опирающегося на экспериментально найденных напряжениях, вычислены параметры механики разрушения. Предложена процедура вычисления коэффициентов ряда Уильямса высокого порядка. С помощью введенных энергетических мер даны оценки погрешностей, допускаемых при удержании различного количества слагаемых представления Уильямса. Доказано, что слагаемые более высокого порядка разложения М. Уильямса позволяют аккуратно описать механические поля у вершины трещины. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами конечно-элементного моделирования (МКЭ). Показано, что амплитудные множители (коэффициенты разложения М. Уильямса), вычисленные экспериментальным методом и МКЭ, находятся в хорошем соответствии друг с другом. Отклонения коэффициентов, найденных опытным и вычислительным подходами, не превышают 5-7%.

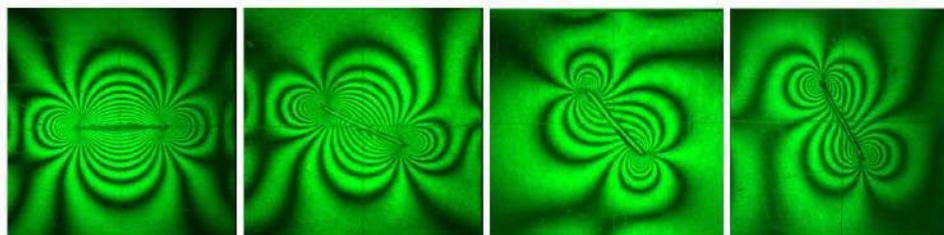


Рисунок 1 – Интерференционные картины: изодромы вблизи горизонтальной и наклонной трещины
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 21-11-00346).

Литература

- [1] Kostuk R.K. Holographic Interferometry. – Boca-Ranton: CRC, 2019. – 352 с.
- [2] Дильман В.Л., Уткин П.Б. Двухпараметрический метод определения коэффициента интенсивности напряжений KI трещиноподобных дефектов методом голографической интерферометрии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2022. – Т. 14, в. 3. – С. 60–67.
- [3] Степанова Л.В., Белова О.Н., Туркова В.А. Определение коэффициентов разложения М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины с помощью метода цифровой фотоупругости и метода конечных элементов // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2019. – Т. 25, вып. 3. – С. 62–82

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПЛОСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
stepasheva.ed@gmail.com*

В докладе представляются результаты численного моделирования распространения плоской изотермической воздушной струи в прямоугольной полости размерами $20 \times 20 \times 50$ см³. Подача струи осуществляется через щелевое сопло высотой 1 см, размещенное со стороны одной из торцевых границ на некотором удалении от нее. Средняя скорость воздуха на срезе сопла составляет 6 м/с, что соответствует значению числа Рейнольдса 4×10^3 . Согласно экспериментальным данным [1], при определенном положении щелевого сопла течение приобретает автоколебательный характер: струя поочередно отклоняется к верхней и нижней стенкам полости, что было зафиксировано измерениями скорости в точках мониторинга.

Исходная расчетная постановка полностью соответствовала условиям эксперимента [1], где торцевая граница полости ниже и выше сопла была открыта. Для воспроизведения условий эксперимента потребовалось включить в расчетную область дополнительный объем, присоединенный к торцевой границе, и поставить выходные условия на его внешней поверхности. Расчеты проводились на основе вихреразрешающего метода моделирования крупных вихрей (LES, с использованием подсеточной модели WMLES S- Ω) и с помощью решения нестационарных осредненных уравнений Рейнольдса (метод URANS, для замыкания использовалась k- ω SST модель турбулентности). Использовались построенные в пакете ICEM CFD сетки с гексагональными ячейками: число ячеек в LES расчетах от 6.5 до 20 млн, в URANS – от 2 до 6 млн.

Результаты статистической обработки полученных в LES расчетах данных показали, что ведущая частота и амплитуда колебаний скорости соответствует фиксировавшейся в эксперименте. Периодические колебания примерно тех же частоты и амплитуды были предсказаны и в URANS моделировании. Сопоставляется и полученная с применением двух подходов эволюция поля течения, включая крайние положения точек присоединения струи.

Помимо исходной постановки, были рассмотрены конфигурации полости с локализованными щелевыми выходами высотой 2 см. В отличие от исходной, такая постановка представляет собой модель вентилируемого помещения, при этом варьировались как положения выходов (на одной или обеих торцевых стенках), так и их ширина (от 6 до 20 см). Параметрические расчеты в указанной постановке проводились с использованием метода URANS. Выявлено, что при переходе к локализованным выходам характер автоколебательного течения меняется: струя устойчиво отклоняется к верхней или нижней стенке, при этом сохраняются низкочастотные колебания струи как единого целого с периодическим смещением положения точки присоединения струи, характеризующиеся меньшей амплитудой.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-29-00224.

Литература

[1] Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling //Flow, Turbulence and Combustion. – 2001. – Vol. 67. – P. 267-304.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ДЕФОРМАЦИИ В МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРАХ

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

sov@icmm.ru

Магнитоактивный эластомер (МАЭ) – это композит, мягкая полимерная матрица которого наполнена высокодисперсными частицами ферромагнетика. Приложенное магнитное поле вызывает сильное изменение материальных параметров МАЭ и создаёт в нём высокую индуцированную деформацию. Материалы этого типа имеют широкие возможности применения, включая, например, робототехнику, вибро- и сейсмозащиту.

Ранее [1,2] была предложена мезоскопическая модель магнитодеформационного отклика МАЭ, основанная на решении задачи о взаимодействии двух ферромагнитных частиц, погружённых в упругую матрицу. Отличительной чертой этой модели является уточнённое описание магнитоэластического взаимодействия частиц: использование мультипольных разложений со значительным числом слагаемых взамен простого дипольного приближения. Как оказалось, в случае магнитомягких (безгистерезисно намагничивающихся) частиц эта замена существенно увеличивает величину магнитной силы при образовании кластера.

Полученные численно зависимости упругих и магнитных сил от межчастичного расстояния и от угла между направлением поля и межцентровым вектором пары были затем представлены в виде компактных интерполяционных формул, обеспечивающих хорошую степень приближения точных результатов во всём реально значимом диапазоне изменения внешних параметров. В рамках этой модели было продемонстрировано наличие в ней бистабильности: гистерезисный переход «разделённой» пары частиц в кластер и обратно при изменении приложенного поля.

В настоящей работе предложена некоторая модификация указанной модели, которая позволяет описать гистерезис деформации МАЭ при квазистатическом изменении внешнего в гораздо лучше, чем прежде, согласии с экспериментальными данными.

Литература

- [1] Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Mesoscopic magnetomechanical hysteresis in a magnetorheological elastomer // Phys. Rev. E. – 2015. – V. 92. – Art. no. 023202 (9 pp.)
- [2] Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Mesostructural origin of the field-induced pseudo-plasticity effect in a soft magnetic elastomer // IOP Conf. Ser. – 2019. – V. 581. – Art. no. 012003 (7 pp.)

О МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ АЗИМУТАЛЬНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С КОЛЕБЛЮЩИМСЯ ЯДРОМ

Субботин С.В.¹, Ширяева М.А.¹, Шмакова Н.Д.², Ерманюк Е.В.², Козлов В.Г.¹

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

subbotin_sv@pspu.ru, ermanyuk@hydro.nsc.ru, kozlov@pspu.ru

Экспериментально исследуется нелинейный отклик жидкости, связанный с распространением инерционных волн во вращающемся сферическом слое. Источником волн является внутреннее ядро, совершающее колебания вокруг оси вращения. В результате осциллирующего движения в жидкости возбуждается осредненное азимутальное течение со сложным профилем скорости, структура которого зависит от пространственно-волновой картины [1]. С увеличением амплитуды колебаний инерционные волны испытывают неустойчивость по сценарию триадных взаимодействий [2]. Неустойчивость проявляется в разных областях сферического слоя одновременно с одинаковыми частотами, но различными волновыми числами. Так, на периферии вблизи стенки полости проявляются субгармоники с короткой длиной волны, в то время как вблизи оси вращения индуцируются длинные волны. Развитие триадного резонанса приводит к сильному нелинейному отклику жидкости: вдоль оси вращения пороговым образом формируются осреднённые вихревые структуры с азимутальной периодичностью [3]. Субгармоники внешних и внутренних триад могут взаимодействовать между собой, что проявляется в изменении скорости азимутального дрейфа осреднённых структур. Детальное исследование структуры пульсационного течения обнаруживает наличие ограниченной области частот, в которой возбуждаются собственные инерционные колебания жидкости в виде глобальных вихревых структур (инерционные моды). В этом случае в надкритическом режиме проявляется неустойчивость параметрического субгармонического резонанса, при котором дочерние волны рождаются на одной частоте, равной половине фундаментальной частоты. Показано, что изменение вида триадного резонанса оказывает существенное влияние на динамику осреднённых вихревых структур.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№18-71-10053).

Литература

[1] Subbotin S., Shiryayeva M. On the linear and non-linear fluid response to the circular forcing in a rotating spherical shell // *Phys. Fluids*. 2021. V. 066603.

[2] Boury S., Sibgatullin I., Ermanyuk E., Shmakova N., Odier P., Joubaud S., Maas L.R.M., Dauxois T. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor // *J. Fluid Mech*. 2021. V. 926. A12.

[3] Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // *Phys. Fluids*. 2022. V. 34. 064103.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АТТРАКТОРОВ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Субботин С.В.¹, Шмакова Н.Д.², Козлов В.Г.¹, Ерманюк Е.В.²

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

subbotin_sv@pspu.ru, ermanyuk@hydro.nsc.ru

Линейная динамика аттракторов инерционных волн достаточно хорошо изучена для случая сферического слоя вращающейся жидкости [1]. Ряд вопросов нелинейной динамики рассмотрен теоретически и численно для канонической области в двумерной постановке (тор бесконечного радиуса) [2, 3]. В [4] была предложена экспериментальная и численная постановка задачи о нелинейной динамике волновых аттракторов в цилиндрическом слое вращающейся жидкости, который ограничен двумя соосными цилиндрами, коническим дном и плоской деформируемой крышкой, с помощью которой задавалось осесимметричное возмущающее воздействие. Было показано, что при увеличении амплитуды возмущающего воздействия в системе возникает неустойчивость по механизму триадного резонанса, приводящая к потере осесимметричного режима течения и развитию азимутально периодических структур – формированию полигонального вихревого кластера циклонических вихрей.

В настоящем докладе представлены результаты экспериментального исследования нелинейной динамики волновых аттракторов в установке, имеющей геометрию близкую к [4], но в качестве возмущающего воздействия использована нутация плоской кольцевой крышки, ограничивающей жидкий объем. Показано, что в такой постановке (т.е. в системе с амфидромной точкой) наблюдается ряд явлений, близких к наблюдаемым в сферическом слое вращающейся жидкости, возмущаемом круговыми колебаниями внутреннего ядра [5]. Выполнен подробный анализ компонент волновых полей в линейном и нелинейном режимах в меридиональных и экваториальных сечениях жидкого объема. Исследована эволюция частотных и пространственных спектров волновых полей с ростом амплитуды возмущения при развитии процесса по времени. Особое внимание уделено идентификации и анализу осредненных по времени зональных течений и азимутально-периодических структур. Показано, что магнитуды, радиальные профили и направления зональных течений существенным образом зависят от режима движения в системе: 1) линейный с чисто вязкой диссипацией, 2) слабо нелинейный при наличии триадного резонанса, 3) сильно нелинейный с развитыми азимутальными структурами и сложным спектральным составом в низкочастотной области. Показано, что развитые азимутальные структуры могут быть идентифицированы как волны Россби.

Литература

- [1] Rieutord M., Valdettaro L. Viscous dissipation by tidally forced inertial modes in a rotating spherical shell // J. Fluid Mech. 2010 V. 643. P. 363-394.
- [2] Ogilvie G.I. Wave attractors and the asymptotic dissipation rate of tidal disturbances // J. Fluid Mech. 2005. V. 543. P. 19-44.
- [3] Jouve L., Ogilvie G.I. Direct numerical simulations of an inertial wave attractor in linear and nonlinear regimes // J. Fluid Mech. 2014 V. 745. P. 223-250.
- [4] Boury S., Sibgatullin I., Ermanyuk E., Shmakova N., Odier P., Joubaud S., Maas L.R.M., Dauxois T. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor // J. Fluid Mech. 2021. V. 926. A12.
- [5] Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // Phys. Fluids. 2022. V. 34. 064103.

РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

Султанов Л.У., Кадиров А.М.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
lenar.sultanov@kpfu.ru, almmkadirov@kpfu.ru

Работа посвящена построению методики исследования больших упругопластических деформаций с учетом повреждаемости материала.

Вводится тензор градиента деформации, который показывает изменение элементарного ориентированного отрезка при деформации. Для описания конечных деформаций и скорости деформации используются тензоры меры деформации Фингера, тензор пространственного градиента скорости, тензор деформации скорости.

Разрешающее уравнение строится линеаризацией уравнения принципа виртуальных мощностей в актуальной конфигурации [1, 2].

Полные скорости деформации представляются в виде суммы упругой и пластической составляющих [1, 2]. Используется ассоциативный закон течения. В качестве критерия упругого деформирования служит условие Губера – Мизеса.

Процесс деформирования представляется в виде последовательности равновесных состояний. Переход от предыдущего равновесного состояния к следующему равновесному состоянию происходит путем пошагового приращения нагрузки. Считается, что на основе известных параметрах k -го состояния нужно найти параметры k -го состояния. При возникновении пластических деформаций применяется метод проецирования напряжения на поверхность текучести [6].

В соответствии с положениями механики поврежденной среды, для характеристики поврежденности элементарного объема материала на микроуровне, вводится скалярный параметр ω , который принимает значения от 0 (материал не поврежден) до 1 (материал полностью разрушен).

Определение поврежденности соответствующего типа предполагает описание механики поведения среды в рамках исследуемого явления, построение эволюционного уравнения накопления поврежденности. В этом случае для описания напряженного состояния вводится тензор эффективных напряжений.

Численный расчет основан на методе конечных элементов.

Литература

- [1] Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел – Казань, 2001. – 301 с.
- [2] Голованов А.И., Султанов Л.У. Теоретические основы вычислительной нелинейной механики деформируемых сред – Казань, 2008. – 164 с.
- [3] Капустин С.А., Лихачева С.Ю. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов с периодически повторяющейся структурой – Н. Новгород, 2012. – 96 с.
- [4] Lemaitre J. A course on damage mechanics – Berlin, 1996. – 228 p.
- [5] Lemaitre J., Desmorat R. Engineering damage mechanics – Berlin, 2005. – 380 p.
- [6] Sultanov L.U., Kadirov A.M. Modeling of Deformation of Solids with Material Damage // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. – Vol. 141. – 2022. – P. 473–483.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Сухановский А.Н., Попова Е.Н., Васильев А.Ю.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
san@icmm.ru*

Общая циркуляция атмосферы играет важнейшую роль в погодных и климатических процессах, поскольку обеспечивает перенос и перераспределение тепла и углового момента. Структура и динамика глобальной циркуляции атмосферы очень сложны и зависят от множества факторов, таких как вращение, солнечный нагрев, топография поверхности и т.д. Глобальная атмосферная циркуляция имеет конвективную природу, и ее движущей силой является меридиональная разница температур. Заметное потепление над арктическим полюсом приводит к уменьшению температурного контраста между полюсом и экватором [1], что может повлиять на интенсивность и структуру крупномасштабной циркуляции и вероятность погодных экстремумов [2]. Есть некоторые свидетельства того, что арктическое потепление увеличивает меандрирование среднеширотного зонального потока и снижает скорость дрейфа крупномасштабных волн [3]. Однако использование различных данных, моделей, подходов, метрик и интерпретаций приводит к противоречивым выводам относительно роли арктического потепления [2]. Моделирование арктического потепления в идеализированной постановке может помочь в понимании того, как этот процесс влияет на циркуляцию в средних широтах. Лабораторное моделирование реализовано при помощи модели [4,5]. Лабораторная модель воспроизводит основные черты глобальной атмосферной циркуляции, а именно антициклоническое течение на малых широтах, циклоническую циркуляцию в области средних и полярных широт, формирование крупномасштабных бароклинных вихрей и три меридиональные ячейки (Хэдли, Ферреля и полярную). Моделирование арктического потепления проводилось при помощи нескольких конфигураций, а именно с центральным холодным теплообменником, с пластиковым диском и со свободной поверхностью. Эксперименты проведены для различных угловых скоростей вращения (от 0.08 рад/с до 0.48 рад/с). Показано, что наличие центрального охлаждения, даже малой мощности оказывает существенное влияние на формирование бароклинных волн.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-61-00098.

Литература

- [1] You Q. et al. Warming amplification over the Arctic Pole and Third Pole: Trends, mechanisms and consequences // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 217. – P. 103625.
- [2] Overland J. E. et al. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // *Nature Climate Change*. – 2016. – V. 6. – №. 11. – P. 992-999.
- [3] Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming // *Environmental Research Letters*. – 2015. – V. 10. – №. 1. – P. 014005.
- [4] Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н. Режимы течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // *Пермские гидродинамические научные чтения : сборник статей по материалам VIII Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова / отв. ред. Т. П. Любимова. Пермь, 2022. 537 с. стр. 434-438.*
- [5] Sukhanovskii A., Popova E.A. shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // *arXiv preprint arXiv:2210.15266*. – 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.15266>

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛЯЦИИ КОЖНОЙ МИКРОГЕМОДИНАМИКИ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ В ОТВЕТ НА ОРТОСТАЗ У БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ 2ГО ТИПА

Танканаг А.В.¹, Тихонова И.В.¹, Гусева И.Е.², Гриневич А.А.¹

¹ *Институт биофизики клетки Российской академии наук - обособленное подразделение
ФГБУН ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино*

² *ФГАУЗ Больница Пущинского научного центра Российской академии наук, Пущино
tav@icb.psn.ru*

В последние годы все большую актуальность приобретает концепция сетевой физиологии, в рамках которой организм рассматривается как многоуровневая сеть связанных органов и систем. В этой связи, особый интерес представляет анализ взаимодействий между регуляторными процессами, которые обеспечивают нормальное функционирование организма в целом, а их изменение может служить индикатором микросудистых нарушений при неинвазивной диагностике социально значимых заболеваний, в частности, при сахарном диабете 2го типа (СД2Т). Целью исследования было изучить фазовые взаимодействия между колебаниями кожной микрогемодинамики верхних и нижних конечностей в покое и в ответ на изменение положения тела (ортостаз) у здоровых добровольцев и пациентов с СД2Т. В исследовании участвовали 22 пациента с СД2Т и 22 условно здоровых добровольца. Диагноз СД2Т был верифицирован по биохимическим анализам и наблюдению за состоянием пациентов в клинике. Для каждого участника регистрировали две серии 15ти минутных записей: в положении лежа (покой) и сидя ноги на полу, руки на 10-15 см ниже уровня сердца (ортостаз). Регистрация включала одновременные записи электрокардиограммы (ЭКГ), дыхательного ритма и динамики колебаний кожной микроциркуляции правого предплечья вблизи лучезапястного сустава и правой стопы между головками 1й и 2й плюсневых костей. Сигналы ЭКГ преобразовывали в последовательности RR-интервалов для анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР). Для всех сигналов проводили спектральный анализ и оценивали степень фазовой синхронизации по величине функции фазовой вейвлет-когерентности (ФВК). У больных СД2Т низкочастотный (НЧ) спектральный компонент ВСР был ниже в покое и в ответ на ортостаз, а высокочастотный (ВЧ) - ниже только в ответ на ортостаз по сравнению со здоровыми участниками. В СД2Т группе амплитуда миогенных колебаний кожного кровотока предплечья в покое была ниже относительно контрольной группы. У пациентов с СД2Т амплитуды эндотелиальных, нейрогенных и миогенных колебаний кожной микроциркуляции стопы в покое были ниже, чем у здоровых. Анализ фазовых взаимоотношений выявил достоверное снижение значений ФВК между ВСР и колебаниями кожной микрогемодинамики как предплечья, так и стопы в НЧ интервале в покое и при ортостазе у больных СД2Т по сравнению со здоровыми. В ВЧ интервале значения ФВК между ВСР и колебаниями кожной микрогемодинамики стопы были ниже в СД2Т группе относительно контроля. В СД2Т группе было обнаружено снижение значений ФВК между колебаниями периферического кожного кровотока стопы и предплечья в респираторном интервале (~ 0.3 Гц) в ответ на ортостаз относительно контрольной группы. Таким образом, предложенная методика анализа фазовых взаимоотношений между колебаниями кожной микрогемодинамики может быть эффективно использована для анализа изменений в механизмах регуляции периферического кровотока конечностей в ответ на различные воздействия при патологиях, включая СД2Т.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-15-00215).

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА АУКСЕТИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

Тарасова А.С.¹, Ташкинов М.А.¹, В.В. Зильбершмидт²

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

² *Университет Лафборо, Лафборо*

a.tarasova@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru, v.silberschmidt@lboro.ac.uk

Большинство природных структур характеризуются положительным коэффициентом Пуассона. Отрицательный коэффициент может быть достигнут с помощью рационально спроектированной архитектуры геометрии ячейки при создании механических метаматериалов. Геометрия ауксетика допускает поперечное расширение (сжатие) при продольном растяжении (сжатии). Такой механизм деформации полезен для достижения высокой ударной прочности, сопротивления сдвигу, вдавливанию и разрушению. По этим причинам ауксетичные метаматериалы имеют большой потенциал во многих областях.

В данной работе были рассмотрены ауксетичная решетчатая структура и двухфазные композиты с ауксетичной матрицей и наполнителем с различными свойствами. Существует необходимость фундаментального понимания влияния наполнителя на ауксетичные свойства композитов. Одна из наиболее распространенных геометрических форм ауксетичных ячеек – повторно-входящая элементарная ячейка. Ее ауксетичное поведение сохраняется не зависимо от ориентации ячейки (осевой или поперечной). Для исследования механического поведения решетчатых и двухфазных ауксетичных структур при растяжении были разработаны трехмерные конечно-элементные модели. Каждая структура была дискретизирована с помощью тетраэдрических твердотельных элементов в Wolfram Mathematica и затем перенесена с помощью разработанного скрипта в SIMULIA Abaqus как модель с типом элементов C3D4 для проведения квазистатического моделирования растяжения. Соответствующие константы материала и свойства сечения также были назначены скриптом.

Было исследовано влияние модуля упругости наполнителя на эффективный коэффициент Пуассона двухфазной ауксетичной композитной структуры. Проведен статистический анализ распределения напряжений в решетке с различными свойствами наполнителя относительно предела прочности. Продемонстрировано, что изменение упругих свойств наполнителя может резко снизить способность структуры сохранять эффективное отрицательное значение коэффициента Пуассона. Это может быть полезно, например, для проектирования биомедицинских имплантатов и устройств, а также для прогнозирования их поведения под влиянием окружающей среды.

Численные модели созданы при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596011. Экспериментальные исследования выполнены в рамках гранта, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-578 от 31.05.2021 г.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОРИСТЫХ НАНОПЛАСТИНОК,
НАХОДЯЩИХСЯ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ С УЧЁТОМ ВЛАЖНОСТИ.**

Тебякин А.Д.¹, Крысько В.А.¹

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск
prototype9235@mail.ru, tak@san.ru*

Построена математическая модель физически нелинейных функционально-градиентных пористых нанопластин, находящихся в температурном поле с учётом влажности. При построении математической модели приняты следующие гипотезы: 1. Кинематическая гипотеза Киргофа; 2. Упруго-пластические свойства учитываются с помощью деформационной теорией пластичности; 3. Нано эффекты учитываются по модифицированной моментной теорией упругости; 4) Отсутствуют ограничения на температурное поле, которое определяет решения 3-х мерного уравнения теплопроводности; 5) Пористость материала (материал пластинки – композит состоящий из металла SUS304 и керамики Si₃N₄) задаётся функционально (U-PFGM, O-PFGM, X-PFGM)[1]; 6) Модуль упругости и коэффициент Пуассона керамики и металла зависят от температуры; 7) Материал керамики упругий, материал металла упруго-пластический.

Искомые дифференциальные уравнения, краевые начальные условия получены из принципа Гамельтона-Остроградского. В качестве метода исследования принят итерационный метод, состоящий из двух методов вложенный один в другой: Метод переменный параметров упругости Биргера и Метод вариационных итераций (Расширенный метод Канторовича). Математическое обоснование этих итерационных подходов дано в работах Кириченко В.Ф., Крысько В.А. [2], Воровича И.И. и Красовского Ю.П. Эффективность такого подхода была продемонстрирована в ряде работ. [3]

В работе исследована сходимость метода решения уравнений, полученных с помощью разработанного метода математического моделирования физически нелинейных функционально-градиентных пористых нанопластин, находящихся в температурном поле с учётом влажности. Получены новые эффекты, связанные с тем, что при определённом законе температурного воздействия на пластинку наблюдается потеря её устойчивости; исследуется параметр нано на устойчивости шарнирно-опёртой функционально-градиентной пористой нанопластинки.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № №22-11-00160, <https://rscf.ru/project/22-11-00160>

Литература

- [1] Fan F., Yuanbo X., Saeid S., Babak S. Modified couple stress-based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally graded microplates using NURBS-based isogeometric approach. *Comput Meth Appl Mech Eng* 372:113400 2020.
- [2] Kirichenko VF, Krysko VA The variational iteration method in the theory of plates and shells and its justification. *Appl Mech XV I(4):71–76* 1981.
- [3] Тебякин А. Д., Крысько А. В., Жигалов М. В., Крысько В. А. Упругопластическое деформирование нанопластин. Метод вариационных итераций (расширенный метод Канторовича) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 494-505.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАТЕТЕРА И СКОРОСТИ ИНФУЗИИ НА ГЕМОДИНАМИКУ КАТЕТЕРИЗИРОВАННОГО СОСУДА

Тимкина Т.Д. ¹, Чудинов В.С. ^{1,2}, Шардаков И.Н. ², Иванов Я.Н. ¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
woywi@mail.ru

Для лечения широкого спектра заболеваний используются такие инвазивные медицинские устройства как периферические и центральные венозные катетеры. Согласно проведенным исследованиям, внедренный в кровеносный сосуд катетер и инфузия лекарства оказывают большое влияние на кровоток в вене [1]. Кроме того, только одно присутствие катетера в вене приводит к низкой скорости циркуляции крови в области кончика катетера [2]. Существуют хорошо установленные связи между параметрами течения крови, такими как застой, высокое напряжение сдвига и турбулентность, с тромботическими процессами, такими как коагуляция, активация и агрегация тромбоцитов [3, 4]. Однако в современной научной литературе недостаточно осведомлено влияние геометрии устройства, угла введения, скорости инфузии и близости катетера к стенке вены на гемодинамику крови [2].

В данной работе исследуется влияние параметров венозных катетеров (размер катетера, угол введения, скорость инфузии) на гемодинамические характеристики потока крови в катетеризированном сосуде. Моделирование сосудистого кровотока проводилось с помощью вычислительной гидродинамики в пакете Ansys Fluent. Результаты показывают, что наибольшее влияние оказывает скорость инфузии катетера, а наличие катетера без инфузии вызывает зону рециркуляции с низкой скоростью. С помощью найденных характеристик были подобраны оптимальные диаметр, угол введения катетера и скорость инфузии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/875 от 04.04.2022 г. и в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

Литература

- [1] Nifong T.P., McDevitt T. J. The effect of catheter to vein ratio on blood flow rates in a simulated model of peripherally inserted central venous catheters // Chest. – 2022. – Vol. 140. – No. 1. – P. 48-53.
- [2] Piper R., Carr P. J., Kelsey L. J., Bulmer A. C., Keogh S., Doyle B. J. The mechanistic causes of peripheral intravenous catheter failure based on a parametric computational study // Scientific reports. – 2018. – Vol.8. – No. 1. – 3441.
- [3] Nesbitt W.S., Westein E., Tovar-Lopez F.J., Tolouei E., Mitchell A., Fu J., Carberry J., Fouras A., Jackson S. P. A shear gradient-dependent platelet aggregation mechanism drives thrombus formation // Nature Medicine. –2009. – Vol. 15 – No. 1. – P. 665-673.
- [4] Rana K., Neeves K.B. Blood flow and mass transfer regulation of coagulation // Blood reviews. –2016. – Vol. 30. – No. 5. – P. 357-368.

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ МИЛИАРНЫХ И АСИМПТОМНЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КРИТЕРИЯ ИХ РАЗРЫВА

Тихвинский Д.В.¹, Куянова Ю.О.¹, Бервицкий А.В.^{1,2}, Станкевич Ю.А.^{1,3}, Паршин Д.В.¹

¹Институт гидродинамики имени Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России, Новосибирск

³Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

nabster98@yandex.ru, july96@mail.ru, a_bervitskiy@neuronsk.ru, stankevich@tomo.nsc.ru, daniilo.skiman@gmail.com

В современной нейрохирургии важное место занимают милиарные (малые ≤ 3 мм) аневризмы. Такие аневризмы сложно обнаружить даже в ходе томографии головного мозга и еще сложнее определить морфологические и гидродинамические предпосылки к оперированию таких аневризм, учитывая, что риск развития послеоперационных осложнений соотносим с риском разрыва аневризмы [1]. Численные методы гемодинамики – это один из немногих инструментов, способных количественно оценить подобные риски [2]. Одним из наиболее распространенных рисков критериев проведения операции является так называемый критерий PHASES, сочетающий в себе как информацию о морфологических параметрах аневризм, так и об их гидродинамике [3]. Однако, критерии, присутствующие в данном критерии довольно грубо делят выборку (критерии возраста, размера аневризмы и национальности) и не позволяют обеспечить удовлетворительной точности прогнозирования для повсеместного клинического применения.

В настоящей работе приводятся первые результаты динамического наблюдения группы пациентов с церебральными аневризмами. На протяжении нескольких лет проводились контрольные КТ исследования, по результатам которых произведено измерение морфологических и гемодинамических параметров аневризм. Впервые качественно оценена связь указанных параметров и статуса аневризмы в рамках одного пациента. Анализ количественных характеристик показывает, что наибольший рост рассмотренных аневризм происходит в направлении увеличения объема купола и при этом наибольшее влияние на этот рост оказывает рост средних скоростей, нежели рост величины касательных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 20-71-10034. Коллектив авторов благодарит ФНЦ (Новосибирск) за сотрудничество в рамках данного проекта.

Литература

- [1] International Study Of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial aneurysms—risk of rupture and risks of surgical intervention. *New England Journal of Medicine* 339, 1725–1733, (1998).
- [2] D. Tikhvinsky et al. Numerical Assessment of the Risk of Abnormal Endothelialization for Diverter Devices: Clinical Data Driven Numerical Study, *J. Pers. Med.* 2022, 12, 652.
- [3] JP Greving et al. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: a pooled analysis of six prospective cohort studies, *The Lancet Neurology*, Volume 13, Issue 1, January 2014, Pages 59-66.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

Толстых М.А.

*Институт вычислительной математики имени Г.И.Марчука РАН, Москва
Гидрометцентр России, Москва*

Лекция посвящена принципам и методам построения моделей общей циркуляции атмосферы, которые более подробно будут представлены на примере бесшовной системы прогноза на основе модели атмосферы ПЛАВ [1], разработанной в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. Эта модель применяется для оперативного численного среднесрочного и долгосрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России.

Будут рассмотрены основные компоненты гидродинамической модели атмосферы, особенности прогностических уравнений для таких моделей и численных методов решения этих уравнений. Будет также представлено краткое описание модели ПЛАВ.

В последние годы модель ПЛАВ получила развитие как в области вычислительных алгоритмов и их реализации, так и в области описания процессов подсеточного масштаба. На этой основе разработаны три новые конфигурации системы прогноза.

1. Начала оперативные испытания новая версия модели ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза, имеющая горизонтальное разрешение около 10 км в Северном полушарии, 104 уровня по вертикали, что соответствует сегодняшнему среднему мировому уровню.
2. Испытана и внедрена новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды.
3. Разработана и с начала 2022 года испытывается новая система субсезонных и сезонных прогнозов в Гидрометцентре России.

Будут представлены некоторые работы и результаты по новым версиям модели ПЛАВ. В том числе, будут показаны результаты модельной климатологии, полученной по ансамблевым историческим сезонным прогнозам за 1991-2015 годы для различных сезонов года. Модель воспроизводит стратосферное квазидвухлетнее колебание и колебание Мэддена-Джулиана.

Литература

- [1] Толстых М.А. [и др.] Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. – М.: Триада лтд., 2017. – 166 с.

ФАЗОВАЯ РЕДУКЦИЯ ДЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Тюлькина И.В.¹, Голдобин Д.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

irinatiulkina95@gmail.com, denis.goldobin@gmail.com

В данной работе исследуется термоконцентрационная конвекция двухкомпонентной жидкости в подогреваемых снизу смежных горизонтальных ячейках пористой среды при наличии поля тяжести. В каждой ячейке возможна длинноволновая колебательная неустойчивость, для описания которой может быть применена фазовая редукция, позволяющая изучить синхронизацию течений. Горизонтальные границы ячеек полагаются непроницаемыми (в том числе для примеси), т.е. поток вещества равен нулю; тепловой поток через границы является фиксированным. Вертикальные границы имеют малую теплопроводность. Движения жидкости описываются в приближении Дарси-Буссинеска с учетом эффекта Соре. Дополнительно, в рассматриваемой системе есть слагаемое распределенного источника тепла, описывающее теплообмен между ячейками. Отсюда следует, что в уравнениях присутствует связь через температурное поле. Используя метод многих масштабов, можно получить уравнения для длинноволновой конвекции. Аналитическое описание системы, в рамках слабонелинейного анализа, можно построить только вблизи границы конвективной неустойчивости системы. Поскольку вопрос о коллективных эффектах актуален для колебательных режимов, ограничиваемся случаем колебательной неустойчивости. После получения уравнений для амплитуды колебательных мод со связью, выводятся уравнения для фаз колебаний, что является ключевыми уравнениями фазового описания. На их основе были найдены значения параметров, при которых в системе существует режим синхронизации течений, также найдены решения для устойчивого синхронного режима.

Ранее были исследованы течения в тонком слое пористой среды, вызванные локализованным источником тепла или примеси, также были изучены режимы поведения системы [1]. В работе [2] было построено коллективное фазовое описание колебательной тепловой конвекции в ячейках Хеле-Шоу и описана динамика существенно нелинейной колебательной конвекции в системе. В [3] была решена проблема фазового отклика для синхронизации периодических потоков, в частности, описано влияние периодического внешнего воздействия на нестационарный след за цилиндром («дорожку Кармана»).

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

Литература

- [1] Goldobin D.S., Lyubimov D.V. Soret-Driven Convection of Binary Mixture in a Horizontal Porous Layer in the Presence of a Heat or Concentration Source // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2007. – Vol. 104, No. 5. – P. 830.
- [2] Kawamura Y., Nakao H. Collective phase description of oscillatory convection // Chaos. – 2013. – Vol. 23. – P. 043129.
- [3] Taira K., Nakao H. Phase-response analysis of synchronization for periodic flows // J. Fluid Mech. – 2018. – Vol. 846. – P. R2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ МАСЛЕ ПРИ ПРОТЕКАНИИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Уваров С.В., Ефремов Д.В.

ИМСС УрО РАН, Пермь
usv@icmm.ru, efremov.d@icmm.ru

В развитие работ по исследованию поведения жидкостей при высокоинтенсивных воздействиях [1,2] были проведены эксперименты по инициированию гидролюминесценции в узком канале при числах Рейнольдса 1,5-1500. Считалось, что в этом диапазоне поток близок к ламинарному, что позволило оценить скорости деформации в пристеночном слое. В наших экспериментах скорости деформации были в диапазоне $3-8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Было обнаружено следующее: гидролюминесценция представляла собой одиночные импульсы с длительностью фронта 5нс. Интервал между импульсами составлял от 10 с при малых числах Рейнольдса до 1,4мс при больших. На начальном этапе оказалось возможным наблюдать стадийность формирования импульсов. Первая стадия представляет собой скачок интенсивности свечения малой амплитуды (10-15 мВ для выбранного фотодетектора) после чего следовало формирование основного импульса. На малых расходах жидкости основной импульс формировался неустойчиво, иногда происходило формирование с задержкой, иногда импульс не формировался вовсе. При больших расходах жидкости (больших скоростях деформации) импульсы формировались полностью и было невозможно выделить начальный этап. Амплитуда импульсов с фотодетектора в этом случае составляла 50-200 мВ.

Было исследовано распределение интервалов между импульсами аналогично [3]. Было обнаружено следующее: Среднее время между импульсами меняется от 10с до 1,4 мс. Причём по мере повышения числа Рейнольдса это время резко уменьшается по степенному закону, после чего выходит на устойчивое значение. Область свечения при этом сначала формируется вблизи взодного конца канала, а на последнем этапе охватывает весь канал

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства и Пермского края в рамках научного проекта № С-26/562 от 23 марта 2021 г.

Литература

- [1] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушения жидкостей при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, №3. – С. 69-77.
- [2] Multiscale plastic shear instability as mechanism of turbulence / O. Naimark, S. Uvarov, I. Bannikova, D. Efremov // AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures, Tomsk, 01–05 октября 2018 года. – Tomsk: American Institute of Physics Inc., 2018. – P. 020209. – DOI 10.1063/1.5083452.
- [3] Наймарк О.Б., Уваров С.В., Давыдова М.М., Банникова И.А. Многомасштабные статистические закономерности динамической фрагментации // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 94-105.

ОБ УРАВНЕНИЯХ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ МОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ СО СТЕСНЕННЫМ ВРАЩЕНИЕМ

Угрюмов Р.И.¹

¹Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
riugryumov@mail.ru

В классической теории напряжений считается, что частицы взаимодействуют друг с другом через главный вектор силы, главным моментом при этом пренебрегают. Моментная теория помимо силовых напряжений учитывает и моментные. В то время как в общей моментной теории вектор поворота наряду с вектором перемещений считается независимой величиной, в упрощённой моментной теории со стеснённым вращением повороты связаны с перемещениями теми же уравнениями, что и в классической теории.

Будем рассматривать задачу плоской деформации [1]:

$$u_1 = u_1(x_1, x_2), \quad u_2 = u_2(x_1, x_2), \quad \omega_3 = \omega = 1/2(u_{2,1} - u_{1,2}).$$

Выписав для неё уравнения моментной теории упругости со стеснённым вращением [2,3], получим систему из двух разрешающих уравнений относительно перемещений:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu)u_{1,11} + \lambda u_{2,12} + \mu(u_{1,22} + u_{2,12}) - B(u_{1,1122} + u_{1,2222} - u_{2,1112} - u_{1,1222}) = 0, \\ \lambda u_{1,12} + (\lambda + 2\mu)u_{2,22} + \mu(u_{1,12} + u_{2,11}) + B(u_{1,1112} + u_{1,1222} - u_{2,1111} - u_{2,1122}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Можно показать, что, если ввести замену переменных

$$\begin{cases} u_1 = f_{1,1} + f_{2,2}, \\ u_2 = f_{1,2} - f_{2,1}, \end{cases}$$

система (1) может быть записана в виде

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu)\Delta f_1 = \text{Im } w, \\ \mu f_2 = g - 2B\omega, \\ \Delta g = \text{Re } w, \\ 2[B\Delta\omega - \mu\omega] = \text{Re } w. \end{cases}$$

Здесь g и w — это произвольные дифференцируемые функции, вещественная и комплексная соответственно. Тогда исходная система сводится к решению двух уравнений Пуассона и одного уравнения Гельмгольца. Также систему (1) можно записать относительно переменных ω и $\varepsilon = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}$:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu)\varepsilon = \text{Im } w, \\ 2[B\Delta\omega - \mu\omega] = \text{Re } w. \end{cases}$$

В этом случае величина ε , аналог объёмного расширения на плоскости, равна мнимой части произвольной функции w , а поворот ω определяется из решения уравнения Гельмгольца. Рассмотрены примеры.

Литература

- [1] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела: учебное пособие. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
 [2] Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. = Nowacki W. Teoria sprężystości. Warszawa. 1970.
 [3] Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.
 [4] Аннин Б. Д., Остросаблин Н. И., Угрюмов Р. И. Двумерная задача о чистом сдвиге в моментной теории упругости со стеснённым вращением // Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твёрдого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении: Материалы VI Дальнев. конф. с межд. участ. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 173-179.

О ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ПЛАСТИН, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЯ ПРИ ИХ ОТСЛОЕНИИ

К.Б. Устинов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва
ustinov@ipmnet.ru

Получены коэффициенты податливости, описывающие повороты и начальные смещения пластин, моделирующих отслоившиеся участки покрытий в изотропных и анизотропных слоистых структурах. Данные коэффициенты определяют граничные условия при использовании теорий балок (пластин) для описания отслоившихся слоев; они необходимы при решении различных технических задач [1]. Коэффициенты составляют матрицу податливости 6×6 . При получении коэффициентов использовались точные решения для полей напряжения и смещения на достаточном расстоянии от вершины трещины, теорема взаимности и значения J -интегралов для скоростей высвобождения энергии.

Получены общие соотношения между коэффициентами для составных слоев, состоящих из ортотропных частей (с главными осями изотропии, параллельными границам): 9 коэффициентов получены в замкнутом виде; дополнительные соотношения получены с помощью теоремы взаимности, и было показано, что, зная значения скоростей высвобождения энергии для различных мод нагружения, необходимо всего 4 дополнительных условия для получения полного набора коэффициентов. Представлены упрощенные модели с матрицами 6×3 и 4×3 , которые могут быть применены к задачам, где интерес представляют только относительные перемещения и повороты между отсоединенными слоями. В этом случае требуется только одно дополнительное условие для получения матрицы коэффициентов.

Для случая составной плиты, состоящей из двух слоев одинаковой толщины и нулевого второго параметра Дундурса, из решения [2] извлечены 3 из 4 дополнительных уравнений и получены аналитические выражения для 34 из 36 коэффициентов, а также разности двух оставшихся коэффициентов. Для симметричных ортотропных двухслойных плит с использованием теоремы взаимности и значений скоростей высвобождения энергии [3] также получены аналитические выражения для всех кроме двух коэффициентов.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания А ААА-А20-120011690133-1.

Литература

- [1] Andrews, M., Massabo, R. The effects of shear and near tip deformations on energy release rate and mode mixity of edge-cracked orthotropic layers. Eng. Fract. Mech. 2007, 74 (17).
- [2] Ustinov, K. On semi-infinite interface crack in bi-material elastic layer. Eur. J. Mech. A Solids 2019, 75, 56–69.
- [3] K. Ustinov, R. Massabò, D. Lisovenko, Orthotropic strip with central semi-infinite crack under arbitrary loads applied far apart from the crack tip. Analytical solution. Eng. Failure Analysis 2020, 110, 104410.

ПРОЧНОСТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПОРОД, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

К.Б. Устинов¹, В.И. Карев¹, Ю.Ф. Коваленко¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва
ustinov@ipmnet.ru

При испытаниях осадочных пород на установке истинно трехосного нагружения [1] обнаружена анизотропия прочности нетипичного вида, проявляющаяся в монотонном уменьшении прочности с уменьшением угла между плоскостью залегания породы и максимальными прикладываемыми сжимающими напряжениями. Данная зависимость наблюдалось в трех сериях независимых опытов. Результаты экспериментов демонстрируют существование прочностной анизотропии вида, отличающегося от описываемого в литературе и связываемого с возможностью сдвигового разрушения по площадкам ослабления, ориентированных вдоль напластования [2-4].

Обнаруженная прочностная анизотропия может приводить к образованию в скважинах вывалов, направленных в двух противоположных направлениях под действием равнокомпонентного поля напряжений в массиве. Образование вывалов данной формы наблюдалось при прямом физическом моделировании: на образцах с центральными отверстиями под действием равнокомпонентного напряжения. Формирование подобных вывалов под действием равнокомпонентного сжатия наблюдалось и ранее для осадочных пород [6] и угля [7].

При интерпретации результатов каротажных исследований присутствие подобных вывалов, как правило, ассоциируется с наличием неравнокомпонентного поля напряжений, и используется для определения величин и ориентации напряжений [3, 8]. Полученные результаты заставляют по-другому взглянуть на задачу интерпретации скважинных измерений: по крайней мере, учитывать возможность интерпретаций, отличных от различия амплитуд главных напряжений.

Присутствие анизотропии прочности, особенно обнаруженного вида, необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации скважин для уменьшения вероятности их обрушения стенок и предотвращения или минимизации пескопроявлений. Особенно важен данный учет при работе с низкопрочными породами коллекторов газовых и газоконденсатных месторождений, а также пород коллекторов ПХГ (подземных хранилищ газа).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-11-00273.

Литература

- [1] Karev, V; Kovalenko, Y; Ustinov, K Geomechanics of Oil and Gas Wells Springer 2020 184p.
- [2] Germanovich L.N., Galybin A.N., Dyskin A.V., Mokhel A.N., Dunayevsky V. Borehole stability in laminated rock. In G. Barla (Ed.) // Pred. Perform. Rock Mech. Rock Eng., Torino. CRC Press/Balkema, 1996. v. 2, p. 767-776.
- [3] Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. California: Cambridge University Press, 2007. 443 p.
- [4] Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well // J. Min. Sci. 2017. V. 53. № 3. P. 425–433.
- [5] Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media // Mech. Solids. 2013. v. 48. p. 357–363.
- [6] Kaiser P.K. Guenot A, Morgenstern N.R. Deformation of small tunnels. IV. Behaviour during failure // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1985. V. 22. P. 141–152.
- [7] Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Карев В.И. Геомеханический анализ образования вывалов на стенках скважин // Известия РАН МТТ. Принята к печати.
- [8] Zang A., Stephansson O. Stress field of the earth's crust. Dordrecht: Springer, 2010. 322 p.

РЕЖИМЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СИСТЕМЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ РЕАГИРУЮЩИХ РАСТВОРОВ

Уточкин В.Ю., Брацун Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
vyutochkin@pstu.ru, dabracun@pstu.ru

Всё большее внимание привлекает задача о возникновении конвекции в условиях протекания химических реакций. Это связано с фундаментальным характером проблемы и появлением большого числа технологических приложений [1,2]. Свойство химических реакций локально влиять на тепловые и концентрационные поля увеличивает число степеней свободы системы для реализации сценария потери устойчивости. Отношение характерных времен диффузии и реакции достаточно велико для семейства реакций нейтрализации, вследствие чего в жидкости могут формироваться устойчивые потенциальные барьеры, ограничивающие движение жидкости локальными зонами. Явления такого рода являются ярким примером структурообразования в смешивающихся реагирующих растворах вдали от равновесия [3].

В работе [4] экспериментально исследовалась неустойчивость в системе двух реагирующих растворов с межфазной границей. Было обнаружено спонтанное выравнивание фронта конвективной структуры, развившейся в результате неустойчивости Рэлея-Тейлора. В данной работе предлагается теоретическое объяснение эффекта. Начальная конфигурация системы в эксперименте представляет собой два несмешивающихся раствора кислоты и основания, размещенных друг над другом в вертикально ориентированной ячейке Хеле-Шоу. Межфазная граница считается недеформируемой в любой момент эволюции системы. Предполагается, что молекулы кислоты могут проникать через границу свободно, в то время как для молекул основания она непроницаема. В [4] было показано, что верхний слой выполняет роль резервуара кислоты и мало влияет на процессы конвективного переноса в нижнем слое. В связи с этим была предложена математическая модель, которая включает один слой с фиксированным значением кислоты на свободной верхней границе. Сформулирована система уравнений реакции-диффузии-конвекции. Для объяснения нового эффекта впервые модель учитывает эффект производства воды в реакции нейтрализации в водной фазе, который ранее считался несущественным. Эффект задается специальным интегральным соотношением, модифицирующим слагаемое Буссинеска. Численно исследовано динамически меняющееся основное состояние реакции-диффузии в условиях механического равновесия жидкости. Анализ распределений плотности в основном состоянии позволил определить основные бифуркации в системе и получить качественное согласие с картой устойчивости, построенной в работе [4] в пространстве начальных концентраций. Обнаружено четыре качественно различных распределения, потенциально приводящих к четырем сценариям развития конвекции. Эволюция и структура движения в каждом из найденных режимов воспроизводится прямым численным моделированием.

Исследование поддержано Российским Научным Фондом (проект № 19-11-00133).

Литература

- [1] Dupeyrat M., Nakache E. Direct conversion of chemical energy into mechanical energy at an oil water interface // Bioelectrochem. Bioenerg. 1978. Vol. 5. No. 1. P. 134-141.
- [2] Nicolis G., Prigogin I. Self Organization in Non-Equilibrium systems – Wiley-Interscience, New-York. – 1977.
- [3] Bratsun D., Mizev A., Mosheva E. Extended classification of the buoyancy-driven flows induced by a neutralization reaction in miscible fluids. Part 2. Theoretical study // Journal of Fluid Mechanics – 2021. – Vol. 916. – A23.
- [4] Mizev A., Shmyrova A. Buoyancy-driven instabilities induced by a neutralization reaction in immiscible fluids // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1809. – Art. 012030.

АГЛОМЕРАЦИЯ ЧАСТИЦ КВАРЦА В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Фатталов О.О.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

fattalov@mail.ru

Процесс обогащения полезных ископаемых методом флотации является одним из наиболее популярных методов разделения руд, используемых в промышленности. В процессе флотации мелких частиц возникает проблема низкого извлечения ценного продукта из флотационного концентрата. Причиной снижения эффективности флотации в этом случае является низкая вероятность удара частиц руды с флотационными пузырьками. Одним из возможных методов решения проблемы флотации мелких частиц является применение ультразвукового (УЗ) воздействия на флотационную пульпу [1]. В этом случае, при определенных параметрах УЗ воздействия, сила Бьеркнеса способствует образованию агломератов из твердых частиц, располагающихся в узлах стоячей УЗ волны. Существует несколько подходов решения проблемы, основанных на принципе использования УЗ воздействия в процессе флотации [2]. Одним из методов улучшения извлечения мелких частиц флотацией является агрегация этих частиц перед процессом флотации непосредственно во флотационной камере [1,3]. Несколько исследований показали, что акустическая сила, возникающая в результате УЗ воздействия потенциально может быть силой притяжения для частиц, которая способствует их агломерации [4,5].

В экспериментах использовалась кювета, имеющая форму параллелепипеда, с внешними размерами 110×116×160 мм³. Для регистрации процесса формирования агломератов использовалось устройство, состоящее из камеры Basler acA1920-155um, коллимированного источника контрольного света Telecentric HP illuminator (peak wavelength blue, 460 нм, мощность $P < 2.5$ Вт). В качестве источника УЗ вибраций использовался Bandelin Sonopulse HD 4100 с частотой $f = 20$ кГц и максимальной мощностью $P = 100$ Вт. В качестве частиц использовались частицы кварца размером в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм. По фотографиям, полученным в ходе экспериментов, анализировался процесс агломерации частиц, а также исследовалась их динамика. Целью данного исследования было изучение процесса агломерации мелких частиц кварца и динамики сформированных агломератов в результате изменения мощности УЗ воздействия на жидкость.

Эксперименты показали, что существуют различия в динамике формирующихся кластеров из частиц кварца в зависимости от мощности УЗ воздействия. Показано, что формирование агломератов и их временная устойчивость возможны при достижении минимальной пороговой величины мощности УЗ воздействия.

Литература

- [1] Chen, Y., Truong, V. N., Bu, X., Xie, G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation //Ultrasonics sonochemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 104739.
- [2] Chen, Y., Chelgani, S. C., Bu, X., Xie, G. Effect of the ultrasonic standing wave frequency on the attractive mineralization for fine coal particle flotation //Ultrasonics sonochemistry. – 2021. – Т. 77. – С. 105682.
- [3] Filippov, L. O., Filippova, I. V., Barres, O., Lyubimova, T. P., Fattalov, O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment //Minerals Engineering. – 2021. – Т. 171. – С. 107092.
- [4] Chen, Y., Zheng, H., Truong, V. N., Xie, G., Liu, Q. Selective aggregation by ultrasonic standing waves through gas nuclei on the particle surface //Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – Т. 63. – С. 104924.
- [5] Chen, Y., Xie, G., Chang, J., Grundy, J., Liu, Q. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound //Fuel. – 2019. – Т. 248. – С. 38-46.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИТЕРИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Федоренко А.Н.¹, Федулов Б.Н.², Староверов О.А.³, Евлашин С.А.¹, Ломакин Е.В.²

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва

²Московский государственный институт имени М.В. Ломоносова, Москва

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a.fedorenko@skoltech.ru

Растяжение образцов, произведенных под разной ориентацией, остается наиболее распространенным способом изучения упругопластических характеристик металлов, полученных аддитивными технологиями, что подтверждается большим количеством недавних публикаций с использованием такого подхода [1-2]. Получаемые результаты позволяют установить степень анизотропии материала и могут быть весьма существенно дополнены исследованиями микроструктуры и измерениями остаточных напряжений [3]. При этом количество исследований, связанных с другими видами простого (сжатие, сдвиг) [4] и комбинированного нагружения [5], значительно меньше. В данной работе представлены результаты испытаний образцов, произведенных под разной ориентацией при 3D печати, на растяжение, сжатие и сдвиг. В результате было установлено существенное различие в диаграммах нагружения между вертикально ориентированными образцами, и образцами, ориентированными в плоскости подложки. Примечательно, что различие диаграмм на начальном этапе нагружения до предела текучести объясняется высокими остаточными напряжениями в вертикально ориентированных образцах. Кроме того, анализ нагружения образцов при испытаниях проводился с использованием конечно-элементного моделирования, который позволил установить параметры для модифицированного критерия пластичности Хилла с учетом анизотропии и вида нагружения. При этом для моделирования горизонтально ориентированных образцов оказалось допустимым использование единой кривой деформирования для различных видов нагружения.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Литература

- [1] Ronneberg T., Davies C. M., Hooper P. A. Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment //Materials & Design. – 2020. – Т. 189. 108481.
- [2] Fedorenko A. et al. Anisotropy of Mechanical Properties and Residual Stress in Additively Manufactured 316L Specimens //Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 23. 7176.
- [3] Charmi A. et al. Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study //Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Т. 799. 140154.
- [4] Güden M. et al. Orientation dependent tensile properties of a selective-laser-melt 316L stainless steel //Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Т. 824. 141808.
- [5] Williams R. J. et al. Creep deformation and failure properties of 316 L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion under multiaxial loading conditions //Additive Manufacturing. – 2021. – Т. 37. 101706.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ V-ОБРАЗНЫХ НАДРЕЗОВ НЕСЖИМАЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Фёдоров А.Ю., Галкина Е.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
fedorov@icmm.ru, galkina.e@icmm.ru

В задачах теории упругости вершины V-образных надрезов относят к особым точкам, а их окрестности являются зонами сильной концентрации напряжений. В общем случае напряжённо-деформированное состояние в окрестности особых точек определяется геометрией тела вблизи особой точки, механическими характеристиками материала в окрестности особой точки, видом нагружения. Одним из вариантов уменьшения уровня напряжений в окрестности V-образных надрезов является скругление вершины надреза. Другой вариант — заполнение его полости материалом («залечивание»). В работе [1] представлен сравнительный анализ численных результатов о показателях сингулярности напряжений в составном замкнутом клине и однородном клине с гранями, свободными от напряжений. Были рассмотрены случаи различных углов раствора и соотношений модулей упругости однородных частей составного клина при нескольких значениях коэффициентов Пуассона. Одним из главных результатов данной работы является установление аномального влияния на характер сингулярности напряжений коэффициента Пуассона при приближении его значения к 0.5. Это послужило основой для устранения сингулярности напряжений в вершине V-образного надреза при заполнении его полости материалом с коэффициентом Пуассона, близким к 0.5. На численных моделях было продемонстрировано, что сингулярный характер напряжений, а следовательно и концентрация напряжений, могут быть устранены при достаточно больших углах раскрытия. При этом модуль упругости заполняющего материала может быть на несколько порядков меньше модуля упругости основного материала. В работе [2] представлены результаты экспериментального исследования, направленного на подтверждение и оценку эффективности снижения концентрации напряжений вблизи V-образного надреза при заполнении его полости материалом с коэффициентом Пуассона, близким к 0.5, и гораздо меньшим модулем упругости. В ходе проведения испытаний на растяжение получено, что при заполнении такого надреза, материалом с модулем упругости, на три порядка ниже, чем у основного материала, повышение предельной нагрузки составило 15%.

В настоящей работе проведена расширенная серия экспериментов при нескольких глубинах V-образного надреза и при заполнении материалами, имеющими модули упругости на один, два и три порядка ниже, чем у основного материала. Основные образцы вырезаны из листового эбонита в масляной среде в форме брусков. V-образные надрезы глубиной 5 мм, 7.5 мм и 10 мм сформированы специально изготовленным резцом с углом заточки 12.5° на фрезерном станке с ручным управлением. В качестве материалов для заполнения полости V-образного надреза были выбраны три материала, специально изготовленные в Институте технической химии УрО РАН и имеющие модули упругости на один, два и три порядка ниже, чем у основного материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596007).

Литература

- [1] Fedorov A.Yu., Matveenko V.P. Numerical and applied results of the analysis of singular solutions for a closed wedge consisting of two dissimilar materials // *Acta Mechanica*. – 2020. – Vol. 231, No. 7. – P. 2711–2721.
- [2] Fedorov A.Yu., Galkina E.B. Experimental study of the effectiveness of stress reduction near V-shaped notch filled with a certain material // *Procedia Structural Integrity*. – 2023. – 8 pages (in press).

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Федотенков Г.В.^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва

² НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
greghome@mail.ru

Рассматриваются обобщённые модели нелокальной термоупругости стержней с учётом конечной скорости распространения тепла, релаксации тепловых потоков, а также эффектов временной и пространственной нелокальности. Используется подход Эрингена к описанию нелокальной среды [1-4], а также теории обобщённой теплопроводности, основанные на законах Лорда-Шульмана, Грина-Линдси, Грина-Нагди и Мура-Гибсона-Томпсона [5-10]. Для вывода определяющих уравнений и соотношений обобщенной термоупругости для стержней использован вариационный принцип Гамильтона [11]. С целью обобщения полученных уравнений и соотношений привлекается математический аппарат дробного интегро-дифференцирования [12]. Для исследования волновых процессов в стержнях с усложнёнными свойствами предлагается общий подход, основанный на принципе суперпозиции и методе функций влияния. Он состоит в сведении исходной замкнутой математической постановки соответствующих начально-краевых задач с разрешающим интегральным соотношением. Ядрами входящих в них интегральных операторов являются нестационарные функции влияния для рассматриваемых элементов конструкций [13-15]. Для построения функций влияния поставлены соответствующие задачи.

Литература

- [1] Спивак Л.В., Скрыбина Н.Е., Кац М.Я. Водород и механическое последствие в металлах и сплавах – Пермь, 1993. – 343 с.
- [1] Eringen A.C. Nonlocal polar elastic continua // Int. J. Eng. Sci. – 1972. – V. 10. – P. 1–16.
- [2] Eringen A.C., Edelen D.G.B. On nonlocal elasticity // Int. J. Eng. Sci. – 1972. – V.10. –P. 233–248.
- [3] Eringen A.C. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – P. 4703–4710.
- [4] Eringen A.C. Nonlocal Continuum Field Theories – New York: Springer, 2002.
- [5] Lord H., Shulman Y.A. Generalized dynamical theory of thermoelasticity // J. Mech. Phys. Solids 1967. – V. 15 – P. 299–309.
- [6] Green A.E., Lindsay K.A. Thermoelasticity. J. Elast. 1972, 2, 1–7.
- [7] Green A.E., Naghdi P.M. A re-examination of the basic postulates of thermomechanics. Proc. R. Soc. Lond. A 1991, 432, 171–194.
- [8] Green A.E., Naghdi P.M. Thermoelasticity without energy dissipation. J. Elast. 1993, 31, 189–208.
- [9] Quintanilla R. Moore-Gibson-Thompson thermoelasticity. Math. Mech. Solids 2019, 24, 4020–4031. DOI:10.3233/ASY-191576.
- [10] Quintanilla R. Moore-Gibson-Thompson thermoelasticity with two temperatures. Appl. Eng. Sci. 2020, 1, 100006. DOI:10.1016/j.apples.2020.100006.
- [11] Mihajlova E.Y., Tarlakovskii D.V., Fedotenko G.V. A generalized linear model of dynamics of thin elastic shells // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2018. – Vol. 160, № 3. – С. 561-577.
- [12] Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск.: Наука и техника, 1987. – 688 с.
- [13] Okonechnikov A.S., Tarlakovsky D.V., Fedotenko G.V. Spatial Non-Stationary Contact Problem for a Cylindrical Shell And Absolutely Rigid Body // Mechanics of Solids. – 2020. – Т. 55, № 3. – С. 366-376. DOI: 10.3103/S0025654420030127.
- [14] Tarlakovskii D.V., Fedotenko G.V. Impact of non-stationary pressure on a cylindrical shell with elastic core // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2016. – Т. 158, № 1. – С. 141-151.
- [15] Serdyuk A.O., Serdyuk D.O., Fedotenko G.V. Stress-Strain State of a Composite Plate Under the Action of a Transient Movable Load // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 493-502. DOI: 10.1007/s11029-021-09972-z.

ВОЛОЧЕНИЕ ПОЛОСЫ С ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ К ВИДУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Федулов Б.Н.¹, Минаев Н. Г.¹, Федоренко А.Н.², Ломакин Е.В.¹

¹Московский государственный институт имени М.В. Ломоносова, Москва

²Сколковский институт науки и технологий, Москва

fedulov.b@mail.ru

В механике деформируемого твердого тела получил довольно широкое распространение подход решения задач на основе жесткопластического тела. При этом большая часть задач решена с использованием в качестве условия пластичности критерия Мизеса [1]. Тем не менее, для многих задач обработки металлов давлением актуальны другие критерии пластичности, так как рассматриваемые материалы проявляют специфические свойства. Одно из таких свойств чувствительность к виду напряженного состояния. Для некоторых металлов свойственно накопление дефектов в процессе пластического деформирования. Такие дефекты влияют на пластические свойства металла, видоизменяют критерий. При этом образование дефектов, например, пор, при деформировании алюминиевых сплавов может проходить интенсивнее при растягивающих видах нагрузок и менее интенсивно при сжатии [2]. Таким образом, при реализации предельного состояния критерий пластичности может быть существенно видоизменен в зависимости от типа пластического деформирования [3,4].

В данной работе рассматривается задача о волочении полосы из материала чувствительного к виду напряженного состояния. Решение строится, как на основе жестко пластического метода, так и с использованием конечно элементного анализа. Проводится сопоставление результатов.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Литература

- [1] Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М., Гостехиздат, 1956. Переизд.: М., Наука, 1969.
- [2] Gurson A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media. – 1977.
- [3] Lomakin E. V., Fedulov B. N. Plane strain extension of a strip made of a material with stress state type dependent properties and weakened by cuts with circular base //Mechanics of Solids. – 2013. – Т. 48. – №. 4. – С. 424-430.
- [4] Lomakin E. V., Minaev N. G. Stress fields near a circular hole in a porous medium under plane deformation //Mechanics of Solids. – 2020. – Т. 55. – №. 3. – С. 332-339.

ДВИЖЕНИЕ ПОГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В РАЗВИТОМ СВОБОДНО КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ

Филимонов С.А.¹, Гаврилов А.А.¹, Литвинцев К.Ю.¹, Васильев А.Ю.², Попова Е.Н.²

¹Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

bdk@inbox.ru, gavand@yandex.ru, sttipick@yandex.ru, vasiliev.a@icmm.ru

В работе представлено экспериментальное и численное исследование динамики конвективных и тепловых процессов, происходящих в замкнутом параллелепипеде, заполненном водой, в которую погружена теплоизолирующая пластина. Пластина имеет одну степень свободы и может двигаться только вдоль длинной стороны параллелепипеда (рис. 1). Нижняя стенка параллелепипеда горячая, а верхняя холодная. В результате в объеме возникают конвективное течение, которое действует на пластину, и она начинает двигаться. Геометрические и тепловые параметры задачи, определяющие режимы течения, были взяты из экспериментальной работы [1]. Эксперименты показали, что периодические режимы возникают в ограниченном диапазоне отношения размеров тела к размеру полости. При увеличении длины полости возникает хаотический режим движения с остановками диска, а при максимальной рассмотренной длине полости диск сносится в крайнее положение, выйти из которого не может. Используемая в работе математическая модель свободно конвективного течения основывается на решении нестационарных уравнений Навье—Стокса для несжимаемых течений в приближении Буссинеска. Движение пластины моделируется методом погруженных границ [2].

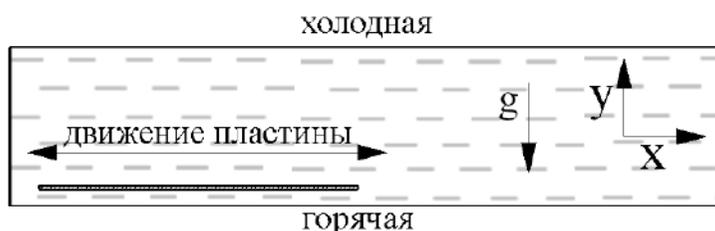


Рисунок 1 – Постановка задачи

Динамика движения пластины исследовалась в зависимости от типа граничных условий, заданных на верхней и нижней границах (фиксированная температура или фиксированный тепловой поток) и постановки расчёта (двух и трехмерный вариант). Результаты расчётов по динамике движения пластины показали хорошее качественное совпадение с экспериментальными данными.

Исследование выполнено за счет проекта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Литература

- [1] Попова Е.Н. и др. Динамика конвективной системы с плавающим протяженным теплоизолятором // Вестник пермского университета. Физика. – 2022. – Т. 3. – С. 38–47.
- [2] Mittal R., Iaccarino G. Immersed boundary methods // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2005. – Т. 37, № 1. – С. 239–261.

МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНОВОГО МАСЛА

Филиппова Ю.А.^{1,2}, Папугаева А.В.¹, Бедин С.А.¹, Разумовская И.В.¹

¹Московский Педагогический Государственный Университет, Москва

²Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Yufi26@list.ru

Полидиметилсилоксан или силиконовое масло, представляет собой тип жидкого полимеризованного силоксана (Si-O), молекулы которого содержат органические боковые цепи. Чем больше повторяющихся мономерных звеньев, тем выше вязкость образца. Силиконовые жидкости относятся к группе псевдопластичных неньютоновских жидкостей со сложными реологическими характеристиками. Они рассматриваются в фундаментальных и прикладных исследованиях и в широком спектре промышленных применений благодаря их благоприятным физическим и термическим свойствам [1]. Для инженерных приложений лучше подходит силиконовое масло с вязкостью от 350 сСт [2].

Магнитная жидкость (МЖ) на основе силиконового масла с наполнителем из дисперсных магнитных частиц отличается магнито-реологическими и магнито-оптическими свойствами. МЖ на основе силикона имеют перспективы применения в медицине в качестве тампонады при отслойке сетчатки глаза, контрастного вещества при рентгеноскопии и противоопухолевой терапии [3], а также в магнитоуправляемой мягкой робототехнике [4].

Обычно дисперсной фазой являются сферические частицы магнетита, однако мы полагаем перспективным использование металлических нанопроволок (НП), полученных с помощью шаблонного синтеза на базе трековых мембран. При этом можно варьировать не только материал НП, но и менять их геометрические размеры (длину и диаметр) и степень анизотропии НП за счет вариации параметров матрицы - трековой мембраны (ТМ). Мы использовали коммерческие ТМ, полученные в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна) из ПЭТФ (полиэтилентерефталат). Важную роль в формировании МЖ играют поверхностно-активные вещества, которые предотвращают агломерацию металлических частиц. В нашей работе для стабилизации частиц использовали лецитин или олеиновую кислоту.

Полученные первые результаты на НП из пермаллоя (Fe:Ni = 37:63) продемонстрировали наличие заметного магнито-реологического эффекта.

Работа выполнена по теме Государственного задания Московского Педагогического Государственного Университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (АААА-А20-120061890084-9) совместно с ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФИЦ РАН «Кристаллография и фотоника». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Литература

- [1] Venczel M., Bognár G., Veress Á. Temperature-dependent viscosity model for silicone oil and its application in viscous dampers // Processes. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 331.
- [2] Liu X. et al. Effect of silicone oil viscosity on the properties of magnetorheological fluids // Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications. – 2015. – Т. 9. – №. January-February 2015. – С. 226-230.
- [3] Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. – 1993. – С.116-118.
- [4] Chung H.J., Parsons A.M., Zheng L. Magnetically controlled soft robotics utilizing elastomers and gels in actuation: A review //Advanced Intelligent Systems. – 2021. – Т. 3. – №. 3. – С. 2000186.

СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ХЕМОМЕХАНИКИ: ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ РЕАКЦИИ

Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
alexander.freidin@gmail.com

Рассмотрены химические реакции между деформируемым твердым и диффундирующим компонентами типа реакций окисления или литизации кремния. Реакция сопровождается собственной деформацией превращения и изменением реологических свойств материала. Развита концепция тензора химического сродства (см. обзорную статью [1] и приведенный в ней список литературы). Вначале дается постановка связанной краевой задачи «диффузия – химия – механика» в предположении, что реакция локализована на фронте реакции. Обсуждается конкуренция между влиянием химических и механических факторов. Выделены случаи, когда фронт реакции может распространяться без воздействия механических напряжений или только под воздействием механических напряжений. В пространстве деформаций построены запретные зоны, образованные деформациями, при которых фронт реакции не может распространяться [2].

Развита процедура анализа устойчивости фронта реакции и детально исследована конкуренция глобальной кинетики фронта реакции и кинетики роста его возмущений [3]. На примере осесимметричной задачи хемомеханики продемонстрирована дестабилизирующая роль полости в твердом теле.

Затем рассмотрены объемные реакции [4]. Проведена ревизия понятий степени превращения и частично превращенной материальной точки. Степень превращения при этом играет роль параметра фазового поля [5]. На основе выведенной формулы для производства энтропии получено выражение термодинамической силы, управляющей объемной реакцией в деформируемом теле. Показано как термодинамическая (конфигурационная) сила для объемной реакции связана с нормальной компонентой тензора химического сродства, где в качестве нормали выступает нормированный градиент степени превращения. Для степени превращения сформулировано кинетическое уравнение. Обсуждаются переход от распределенной в объеме реакции к локализованной.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П).

Литература

- [1] Freidin A. B., Vilchevskaya E. N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Altenbach H., Öchsner A. (eds) Encyclopedia of Continuum Mechanics. Berlin: Springer. 2019.
- [2] Freidin A. B., Sharipova L. L., Forbidden strains and stresses in mechanochemistry of chemical reaction fronts. In: Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 1/ Ed. by Altenbach H. et al (Advanced Structured Materials. V. 89), Springer, Cham. 2018. P. 335–348.
- [3] Freidin A. B., Morozov A., Muller W. H. Propagation and stability of chemical reaction fronts in coupled problems of mechanochemistry // AIP Conference Proceeding. 2021. 2371:020002.
- [4] Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика – Новосибирск: Наука, 1966. – 502 с.
- [5] Schneider D., Schwab F., Schoof E., Reiter A., Herrmann C., Selzer M., Böhlke T., Nestler B. On the stress calculation within phase-field approaches: A model for finite deformations. Computational Mechanics, 2017. V. 60(2). P. 203–217.

ДВУХМЕРНЫЕ БЛУЖДЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ДИСКА В ПОДОГРЕВАЕМОМ СНИЗУ КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ

Фрик П.Г., Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Сухановский А.Н.

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
frick@icmm.ru

Экспериментально исследованы движения погруженного в слой жидкости теплоизолирующего диска диаметром $d=123$ мм, свободноплавающего на высоте h от дна кюветы. Слой жидкости (воды) глубиной H , со свободной верхней поверхностью, подогревается снизу. Дно кюветы, горизонтальные размеры которой составляют 258 x 258 мм, представляет собой медную пластину, поддерживаемую при фиксированной температуре 35°C. Температура на верхней границе после выхода на стационар устанавливается на уровне 32-33 °C. Толщина слоя варьировалась в диапазоне от 10 до 40 мм, что позволяло изменять число Релея в диапазоне $4 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$. Положение диска по высоте h изменялось в экспериментах от 2 до 10 мм. Время эксперимента (после выхода на режим) составляло от 3 до 5 часов.

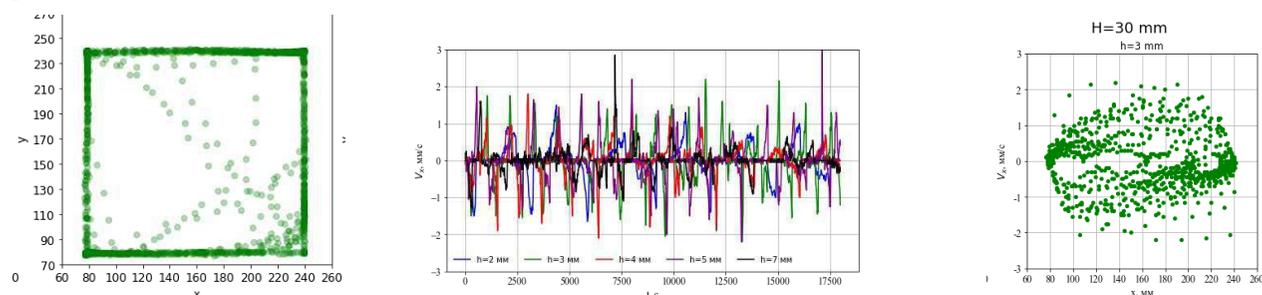


Рис.1. Блуждания диска в слое при $H=30$ мм, $h=3$ мм: положения центра диска (слева), зависимость компоненты скорости V_x от времени, точки фазовой траектории в плоскости (x, V_x) .

Эксперименты показали, что большую часть времени диск проводит вблизи боковых стенок (Рис.1). Если сформировавшееся вокруг него течение отрывает его от стенки, то он чаще всего пересекает полость и упирается в противоположную стенку. Характер возникающих блужданий определяется числом Релея и высотой плавания диска. Наблюдались квазипериодические движения, хаотические движения и движения в виде единичных перемещений. В квазипериодических режимах обнаружился интересный факт, состоящий в том, что движения по каждой их горизонтальных координат качественно похожи на движения погруженного теплоизолятора в одномерной системе [1-2], хотя структура возникающих конвективных течений существенно сложнее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596001.

Литература

- [1] Попова Е.Н., Фрик П.Г. Крупномасштабные течения в турбулентном конвективном слое с погруженным в него подвижным теплоизолятором // Изв. РАН: Мех. жидкости и газа, 2003. №6. С.41-47.
 [2] Попова Е.Н., Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Динамика протяженного теплоизолятора, погруженного в подогреваемый снизу слой жидкости // Вестник Пермского ун-та. Физика. 2022. №3. С.38-47.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ФЛОКЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ СКВОЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Хабин М.Р.^{1,2}, Марышев Б.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
mikhail.khabin@mail.ru, bmaryshev@mail.ru

В ряде экспериментальных данных при исследовании транспорта смеси через горизонтальную колонну, заполненную пористой средой были обнаружены признаки наличия в системе концентрационной конвекции. В работе исследуется течение смеси через массив пористой среды при заданных горизонтальных перепадах давления и концентрации. Целью исследования является определение условий возникновения концентрационной конвекции в условиях характерных для стандартного эксперимента по изучению адсорбционно-десорбционных свойств пористой среды [1].

Рассматривается двумерная задача устойчивости горизонтального течения смеси через прямоугольную область пористой среды. Предполагается, что вертикальный размер области меньше горизонтального в 10 раз. Между вертикальными границами задаётся перепад давления и концентрации, на горизонтальных границах условие отсутствия потока несущей жидкости и примеси. Задача решается в приближении Дарси-Буссинеска [2] транспорт примеси описывается в рамках линейной МММ модели [3]. Задача линейной устойчивости установившегося течения решалась методом Флоке [4] с применением метода Бубнова-Галёркина.

Решена двумерная задача устойчивости режима однородного горизонтального просачивания смеси через прямоугольную область пористой среды. Получены нейтральные кривые в пространстве параметров задачи. Проанализированы зависимости критического значения числа Релея-Дарси и частоты нейтральных возмущений от параметров задачи: числа Пекле и коэффициентов сорбции. Показано, что конвекция может возбуждаться как монотонным, так и колебательным образом, в зависимости от значений параметров.

Литература

- [1] Evgrafova A. E., Kolchanova E. A., Maryshev B. S. Solute transport in a horizontal porous layer at a high solute concentration – Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, – 2021. – т. 2057. – №. 1. – с. 012031.
- [2] Nield D. A. et al. Convection in porous media. – New York : springer, – 2006. – т. 3.
- [3] Van Genuchten M. T., Wierenga P. J. Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions 1 //Soil science society of america journal. – 1976. – Т. 40. – №. 4. – с. 473-480.
- [4] Coddington E. A., Levinson N. Theory of ordinary differential equations. – Tata McGraw-Hill Education, 1955.

РАЗРУШЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОЙ БАЛКИ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

Хвостунков К.А.¹, Федотов К.А.²

¹ИСМАН РАН им. А.Г. Мержанова, Черноголовка

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

khvostunkov@gmail.com, kafedotov.int@gmail.com

Время до разрушения при постоянном нагружении определяется видом кинетического уравнения для меры поврежденности материала. Есть ряд классических решений задачи для нагруженной балки из однородного материала. Характерным для всех этих решений является наличие гипотезы плоских сечений. Обычно вид кинетического уравнения берется в форме аналогичной закону установившейся ползучести Нортона. В решении Работнова-Милейко [1] продольные напряжения в поперечном сечении балки предполагаются постоянными по координате, ортогональной нейтральной оси, аналогично распределению в идеально пластическом шарнире. Вариант с линейным распределением продольных напряжений по упругому закону рассмотрен в работе Локощенко-Печениной-Шестерикова [2] и в работе Кулагина-Локощенко [3], в которой в качестве кинетического уравнения была взята форма на основе дробно-линейного закона установившейся ползучести Шестерикова-Юмашевой.

Авторы данной работы рассматривают двухслойную балку и исследуют величину продольных напряжений и времени до разрушения при трехточечном изгибе в зависимости от параметра отношения модулей Юнга и отношения толщины противоположной стороне приложения нагрузки слоя ко всей толщине балки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00040, <https://rscf.ru/project/22-19-00040/>.

Литература

- [1] Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. М. Наука – 1970г. – 224с.
- [2] Локощенко А.М., Печенина Н.Е., Шестериков С.А. Долговечность цилиндрического бруса при чистом изгибе. //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1988, 9.
- [3] Kulagin D., Lokoshchenko A. Analysis of the influence of aggressive environment on creep and creep rupture of rod under pure bending // Archive of Applied Mechanics. – 2005. June. – 74(8). – P. 518-525.
- [4] Ангдреев А.Н., Немировский Ю.В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины: Изгиб, устойчивость, колебания. – Новосибирск: Наука, 2001. – 288 с.
- [5] Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Том 1. – М. Машиностроение, 1968, - 821 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Хохрякова К.А.¹, Шмыров А.В.¹, Мизева И.А.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь

bca@icmm.ru, shmyrov@icmm.ru, mizeva@icmm.ru

Начиная с 80х годов XX века вопрос о влиянии внешнего магнитного поля на поверхностное натяжение (σ) магнитной жидкости (МЖ) исследуется теоретически [1, 2]. Известно, что на границе раздела магнитная – немагнитная жидкость в нормальном к поверхности МЖ магнитном поле ($H \perp$) существует скачок намагниченности, физическая природа которого заключается в действии сил со стороны неоднородного в переходном слое магнитного поля на магнитные частицы [3]. Экспериментальных исследований зависимости поверхностных свойств МЖ от величины внешнего поля ранее не проводилось и послужило целью данной работы.

В рамках данной работы проведено детальное исследование физико-химических свойств магнитной жидкости с магнетитовыми частицами, стабилизированными олеиновой кислотой на основе декана. Систематически исследованы зависимости поверхностного натяжения и вязкости от концентрации стабилизирующей жидкости и температуры. Для измерения поверхностного натяжения в непрозрачных средах модифицирован метод капиллярных волн [4]. Там, где это возможно, проведено сравнение измеренных физико-химических параметров с результатами, полученными на коммерческих приборах высокого класса точности. Изучено влияние внешнего магнитного поля на поверхностное натяжение магнитной жидкости в диапазоне полей до 5,5 кА/м. Показано, что с ростом напряженности внешнего магнитного поля поверхностное натяжение магнитной жидкости уменьшается, что согласуется с теоретическими результатами других авторов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-01-00648_a

Литература

- [1] Zahn M., Rosensweig R.E. Stability of magnetic fluid penetration through a porous medium with uniform magnetic field oblique to the interface // IEEE Trans. Magnetics. – 1980. – No. 2. – P. 275–282
- [2] Фертман В.Е. Магнитные жидкости. Справочное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 184 с.
- [3] Баштовой В.Г., Тайц Е.М. О некоторых эффектах, связанных со скачком намагниченности на границе раздела магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. – 1985. – № 2. – С. 54–60.
- [4] Голубятников А.Н., Субханкулов Г.И. О поверхностном натяжении магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1986. – № 1. – С. 73–78.
- [5] Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction // Physics of Fluids. – 2019. – V. 31, Is. 1. – P. 012101–8.

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ «ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН» В СССР

Хроматов В.Е.¹, Келлер И.Э.²

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
khromatovvy@mpei.ru, kie@icmm.ru

Индустриализация энергомашиностроения и оборонной промышленности СССР в условиях научно-технической революции потребовала массовой подготовки инженеров-механиков с глубоким и широким университетским образованием, способных рассчитывать новые приборы, машины, самолёты и энергетические установки. Подготовка инженеров-механиков-исследователей по динамике и прочности машин логично вытекала из русской традиции инженеров-механиков живо реагировать на возникающие инженерные проблемы. Около 1900 г. в рамках Политехнического института по инициативе А.Н. Крылова при участии И.Г. Бубнова, П.Ф. Папковича и С.П. Тимошенко создано кораблестроительное отделение, ставшее в 1930 г. Ленинградским кораблестроительным институтом.

В том же 1930 году в Ленинградском политехническом институте начали готовить первых специалистов по динамике и прочности машин. Обучение организовал Евгений Леопольдович Николаи, впоследствии передавший обязанности выдающемуся ученому-механику Анатолию Исаковичу Лурье. На кафедре в разное время работали замечательные ученые — механики и математики Г.Ю. Джанелидзе, М.З. Коловский, А.А. Первозванский, В.В. Новожилов, В.А. Якубович, И.И. Блехман, П.А. Жилин, В.А. Пальмов. В 1958 году кафедру посетил Степан Прокофьевич Тимошенко. В эти же годы подготовка специалистов началась в Харьковском механико-машиностроительном институте. Среди организаторов специальности были профессора И.М. Бабаков, В.И. Блох, А.П. Филиппов, здесь начинал свою деятельность А.С. Вольмир. Южноуральская школа прочнистов-термомехаников, обеспечивающих расчетами безопасность атомных станций, существует в Челябинском политехническом институте с конца сороковых годов и связана с деятельностью выпускника МАИ Давида Ароновича Гохфельда. Кафедра «Космические летательные аппараты» МФТИ была основана в 1956 году на базе ЦНИИмаш. Специальность ДПМ в МВТУ им. Н.Э.Баумана была организована в 1961 году по инициативе профессора С.Д. Пономарева. Большую роль в развитии специальности сыграли профессора Д.И. Шерман, В.Л. Бидерман, В.И. Феодосьев, Н.Н. Малинин, В.А. Светлицкий. В 1962 году специальность «Динамика и прочность машин» была открыта в Московском энергетическом институте по инициативе Владимира Васильевича Болотина, которым были разработаны и прочитаны все спецкурсы. В 1964 году специальность была открыта в Пермском политехническом институте по инициативе Александра Александровича Поздеева. В Брянском институте тяжелого и транспортного машиностроения специальность была организована в 1969 году Львом Николаевичем Никольским. В Новосибирском электротехническом институте подготовка специалистов по динамике и прочности летательных аппаратов началась под руководством Николая Васильевича Пустового. В Московском авиационном институте специальность организована в 1989 году Анатолием Герасимовичем Горшковым.

Киев, Нижний, Самара, Орёл, Волгоград, Омск, Комсомольск... Каждая кафедра динамики и прочности машин в своём городе явилась знаковым событием, научным центром и «кузницей» квалифицированнейших кадров для науки и производства. А.А. Поздеев пришел в ППИ первым доктором наук, а его кафедра подготовила пятьдесят двух. Вокруг организованного им отдела физики полимеров появился Пермский научный центр УрО АН СССР, объединивший усилия множества групп ученых для решения сложнейших задач.

УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ОБРАЗЦОВ: РЕЛАКСАЦИЯ И ПОЛЗУЧЕСТЬ

Цаюков А.А.

Горный Институт УрО РАН, Пермь
bar@mi-perm.ru, andrei.tsayukov@mi-perm.ru

Исследование процессов деформирования и разрушения соляных пород является неотъемлемой частью обоснования параметров подземной разработки месторождений минеральных солей. В свою очередь соляные породы относятся к классу квазипластических геоматериалов, обладают выраженными реологическими свойствами и специфической реакцией на различные внешние воздействия. Ранее была построена упругопластическая модель деформирования больших соляных образцов кубической формы и подобран критерий разрушения (пластического деформирования) [1], который достаточно точно описывает кривые нагружения и поперечных деформаций образцов на различном удалении от их боковых граней.

Описание реологии соляных пород (развития деформаций и разрушений во времени) требует исследования их вязких свойств и обобщение модели пластического деформирования. Для этого были проведены лабораторные эксперименты на релаксацию и ползучесть. Упругопластическая модель деформирования соляных образцов была расширена с учётом вязкости геоматериала. За основу была взята упруго-вязкопластическая модель среды [2].

Численная реализация модели упруго-вязкопластического деформирования и разрушения образцов соляных пород выполнена с помощью метода конечных элементов в перемещениях. Решение систем нелинейных конечно-элементных уравнений производилось методом Ньютона-Рафсона с постоянной матрицей жёсткости. Глобальное интегрирование по времени реализовано в виде автоматической схемы с подшагами и контролем ошибки [3]. Локальное интегрирование упруго-вязкопластических соотношений (в пределах точки интегрирования) выполнено с помощью неявной схемы алгоритма обратного отображения (return-mapping) [4].

В работе рассмотрены несколько основных моделей вязкопластичности. С помощью многовариантного моделирования подобраны их параметры, которые позволяют приемлемо описать экспериментальные кривые релаксации и ползучести соляных образцов.

Литература

- [1] Baryakh A., Tsayukov A. Justification of Fracture Criteria for Salt Rocks // *Frattura Ed Integrità Strutturale* – 2022. – Vol.16, Iss.62 – pp. 585-601. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.40
- [2] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Fox D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics* (7th edition). Butterworth-Heinemann – 2014. – DOI: 10.1016/C2009-0-26332-X
- [3] Sheng D., Sloan S.W., Abbo A.J. An Automatic Newton-Raphson Scheme // *International Journal of Geomechanics* – 2002. – Vol.2, Iss.4. – pp. 471-502. – DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2:4(471)
- [4] de Souza Neto E.A., Perić D. and Owen D.R.J. *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd – 2008. – DOI: 10.1002/9780470694626

ЛОКАЦИЯ ОБЛАСТИ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО КОРРЕЛЯЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цветков Р.В.¹, Гусев Г.Н.¹, Епин В.В.¹, Корепанов В.В.¹, Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[*flower@icmm.ru*](mailto:flower@icmm.ru)

Одной из задач деформационного мониторинга конструкций является поиск места и идентификация механического воздействия. Реальные строительные и инженерные конструкции обладают непростой геометрией и содержат значительное количество связанных между собой элементов с различными механическими свойствами. Происходящие в них волновые процессы имеют сложный пространственно-временной характер, вызванный разной скоростью и путями распространения волн, их отражением и суперпозицией. В этой связи, например, классический способ определения расстояния до источника по разности времени прихода сигналов, хорошо себя зарекомендовавший для однородных и изотропных тел, дает заметную погрешность. Поэтому для случая сложных конструкций представляет интерес исследования по локации воздействий различными методами и их сравнение.

В работе проведен анализ откликов на ударные воздействия в четырехэтажном фрагменте железобетонной монолитной конструкции с целью оценки их местоположения. Экспериментальные данные представляли собой массивы откликов от воздействий с 22 акселерометров, расположенных на основных элементах конструкции. Импульсные однотипные воздействия выполнялись с применением механического ударника в более чем ста точках на колоннах и плитах конструкции. Характер воздействий оценивался с помощью акселерометра на ударнике и ближайшем датчике.

Применен подход к локации ударного воздействия с помощью сравнения вибрационных параметров его отклика с параметрами базового набора ударов, произведенных в известных местах по всей конструкции. Сравнение проводилось с помощью коэффициентов корреляции Пирсона между соответствующими массивами параметров. Таким образом для каждого случая было построено пространственное распределение коэффициентов корреляции, которое должно демонстрировать область ударного воздействия, соответствующую максимальным значениям коэффициентов. В качестве параметров вибрационного отклика были использованы разные амплитудные, частотные и временные характеристики. Такие как максимальная амплитуда сигнала, ее среднеквадратичное значение за определенный интервал времени, значение фурье-коэффициентов, время прихода сигнала до датчиков и др. Анализ результатов позволяет оценить корреляция по каким из этих параметров пригодна для задачи поиска области ударных воздействий в монолитной железобетонной конструкции.

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ С УЧЕТОМ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Чаплий Д.В.¹ Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
Самара

Dch300189@yandex.ru, Stepanova.lv@ssau.ru

Основной целью настоящего исследования является учет влияния накопления поврежденности на напряженно-деформированное состояние вблизи вершины трещины в условиях ползучести с помощью метода конечных элементов. Конечно-элементное моделирование выполнено в SIMULIA Abaqus. В программном комплексе имеется возможность моделирования новых материалов, определяющие уравнения которых, не включены в стандартный набор моделей пакета. Введение новых определяющих соотношений для описания поведения материалов выполнено с помощью UMAT (User Material). Данная подпрограмма определяет механическое поведение материала и скомпилирована на языке FORTRAN.

Рассмотрена двумерная модель пластины с центральной трещиной в условиях одноосного растяжения. Моделирование установившейся ползучести выполнено в соответствии со степенным законом Бейли-Нортон. Степенной закон ползучести, модифицированный путем добавления канонического кинетического уравнения накопления поврежденности Качанова-Работнова в связанной постановке, был описан и внедрен в расчеты с помощью пользовательской процедуры UMAT. Получены картины полей, связанных с окрестностью вершины трещины, в условиях ползучести с учетом аккреции поврежденности. Выполнено сравнение полученных компонент тензоров напряжений и деформаций ползучести у вершины трещины в пластине без учета поврежденности и с ее учетом. На рис. 1. приведены поля сплошности в окрестности вершины трещины в разные моменты времени.

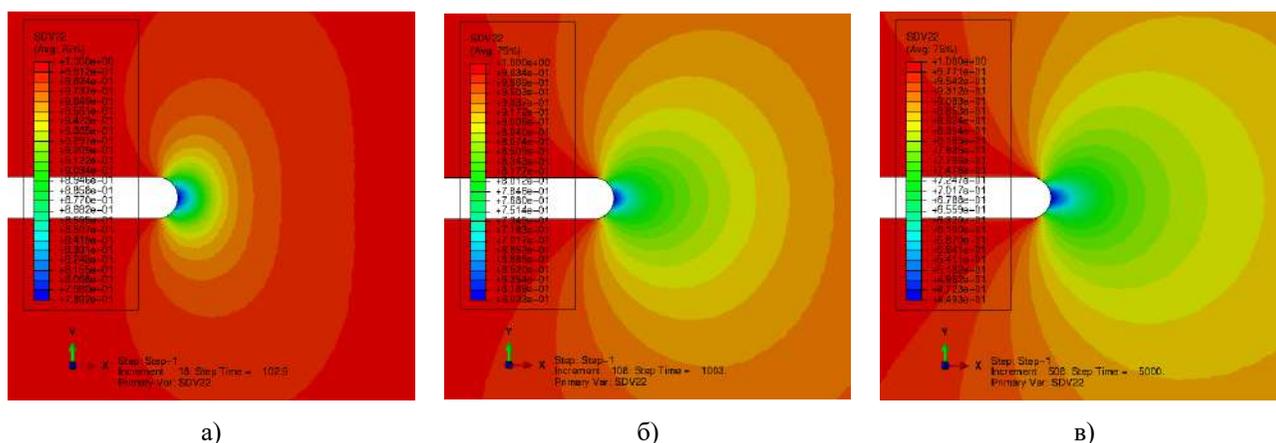


Рис. 1. Распределение сплошности вблизи вершины трещины в условиях ползучести с течением времени а) 103 ч., б) 1003 ч., в) 5000 ч.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 21-11-00346).

Литература

[1] Белова О.Н., Чаплий Д.В., Степанова Л.В. Применение пользовательской подпрограммы UMAT для решения задач континуальной механики (обзор)// Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия, 2021. – Т. 27, № 3 – 46-73 с.

ДИНАМИКА, ЭНЕРГЕТИКА И АКУСТИКА ИМПАКТА СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ

Чашечкин Ю.Д.¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
yulidch@gmail.com

Импакт – последовательность физических процессов, сопровождающих контакт и слияние капли с принимающей средой, изучается все более активно в силу научной значимости темы и практической востребованности данных. Результаты изучения капельных течений представляют прикладной интерес для развития технологий химической и фармацевтической промышленности, авиационных наук в целях усовершенствования двигателей, обеспечения безопасности полетов. Жидкость определяется как сплошная среда, которая характеризуется внутренней энергией и описывается потенциалом Гиббса [1], его производными – термодинамическими величинами (плотностью, давлением, температурой, поверхностным натяжением), кинетическими и другими коэффициентами переноса физических полей.

В силу естественной структуризации среды (существования свободной поверхности, объединений атомов в комплексы, клатраты, разделяющие войды [2]) внутренняя энергия распределена неравномерно. На динамику капельных течений влияет перенос всех компонентов энергии (кинетической, потенциальной, внутренней), а также быстрая конверсия внутренней энергии в другие формы – возмущения плотности, температуры, давления и механические движения. Теория течений основывается на системе фундаментальных уравнений переноса импульса, энергии и вещества с физически обоснованными начальными и граничными условиями, которая замыкается уравнениями состояния для потенциала Гиббса и плотности [3]. Методика экспериментов разрабатывалась с учетом свойств всех компонентов решений системы – и крупных, и тонких лигаментов.

Опыты выполнены на стендах комплекса Уникальных исследовательских установок "ГФК ИПМех РАН" [4]. Изучается динамика и структура процессов при отрыве капли с образованием сателлитов, собственных осцилляциях в свободном падении, первичном контакте с образованием быстрых струек, шипов и капелек, линейчатой и ретикулярной картины распределения вещества [5]. При слиянии и инертных, и химически реагирующих смешивающихся жидкостей, в импактном режиме вещество капли распределяется в толще принимающей жидкости в форме тонких волокон и петель [6]. Обсуждаются требования к методике эксперимента, обеспечивающей выполнение условий полноты описания и контроля точности измерений. Работа поддержана РФФ (проект 19-19-00598-П).

Литература

- [1] Чашечкин Ю.Д. Перенос вещества окрашенной капли в слое жидкости с бегущими плоскими гравитационно-капиллярными волнами // Изв. РАН. Физ. атмосфер. океана. 2022. Т. 58(2), с. 218–229. DOI: 10.31857/S0002351522020031.
- [2] Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Эволюция формы последовательных каверн импакта свободно падающей капли // Доклады РАН. 2022. Т. 502. С. 25–33. DOI: 10.1134/S1028335821120028.
- [3] Гидрофизический комплекс УИУ "ГФК ИПМех РАН": Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
- [4] Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Распад капли на отдельные волокна на границе области контакта с принимающей жидкостью // Доклады РАН. 2021. Т. 497. С. 31–35. DOI: 10.31857/S2686740021020139.
- [5] Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Визуализация областей контакта сред в течениях импакта капли с химическими реакциями // Доклады РАН. 2021. Т. 500. С. 39–47. DOI: 10.31857/S2686740021050023.
- [6] Чашечкин Ю.Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2021. № 1(94). С. 73–92. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92>.

ИНЖЕНЕРНАЯ МАТЕМАТИКА/ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Чашечкин Ю.Д.¹

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
yulidch@gmail.com*

Высокоразрешающие наблюдения показывают, что природные системы – атмосфера и гидросфера Земли, как и технологические процессы, характеризуются тонкой структурой, включающей тонкие и высокоградиентные прослойки и волокна, разделяющие толстые слои с более однородными распределениями параметров. Для описания динамики таких систем обычно привлекаются конститутивные модели. Многообразие вводимых в моделях величин затрудняет проведение сравнения результатов расчетов с данными лабораторных опытов и перенос результатов на реальные условия. Развитие компьютерной техники и программирования позволяет использовать в качестве общей основы теории и методики опытов систему фундаментальных уравнений, объединяющую уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности среды с динамическими уравнениями переноса плотности, вещества, импульса и энергии, включающей внутреннюю энергию [1]. В анализе учитывается макроскопический перенос энергии с потоком или волнами и микроскопический – медленный диффузионный и быстрый конверсионный. Система анализируется с учетом условия совместности, задающего ее ранг, порядок линеаризованной версии и степень характеристического уравнения. Определено минимальное число собственных функций, составляющих полное решение, удовлетворяющее начальным и граничным условиям. Малые диссипативные коэффициенты позволяют находить решения системы методами теории сингулярных возмущений. Проведены расчеты распространения капиллярно-гравитационных поверхностных волн и сопутствующих лигаментов [2], генерации внутренних волн в линейном и слабонелинейном приближении с учетом взаимодействия всех компонентов [3]. Решения базовой системы уравнений определяют набор наблюдаемых физических величин, допускающих определение погрешности проводимых измерений и требования к методике опытов, обеспечивающей регистрацию крупных компонентов и разрешение мелкомасштабных структур.

Разработана методика оптических и контактных исследований течений стратифицированной жидкости, позволяющая визуализировать основные крупномасштабные компоненты – следы, волны и вихри, и выделять лигаменты – тонкие прослойки и волокна. Результаты теневой визуализации и электролитической преципитации картины стратифицированного течения за горизонтальной или наклонной пластиной [4] и сферой, согласуются с данными расчетов внутренних волн, вихрей и следов с учетом эволюционирующей тонкой структуры среды [5]. Опыты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН». Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 19-19-00598-П.

Литература

- [1] Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. 10(4) 286.
- [2] Chashechkin Yu.D, Ochirov A. A. Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field // *Axioms*. 2022. V. 11 (8), 402.
- [3] Chashechkin, Yuli D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics // *Mathematics*. 2021. V. 9 (6). No. 586.
- [4] Chashechkin Yu. D., Zagumennyi I. V. 2D hydrodynamics of a plate: from creeping flow to transient vortex regimes // *Fluids*. 2021. V. 6 (9). 310.
- [5] Chashechkin Y.D. Discrete and continuous symmetries of stratified flows past a sphere // *Symmetry* 2022, 14 (6), 1278.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ В УГЛЕПЛАСТИКАХ ПРИ ТРЕХТОЧЕМНОМ ИЗГИБЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Чеботарева Е.А., Лунегова Е.М., Лобанов Д.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
cem.chebotareva@mail.ru, cem.zubova@mail.ru, cem.lobanov@gmail.com

Полимерные композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, широко используются в различных областях промышленности, так как имеют ряд преимуществ перед другим сырьем. Однако проблема разрушения углепластиков остается актуальной. Выявление механизмов разрушения материала является основой для прогнозирования надежности и износостойкости конструкций [1]. Межслойный сдвиг – тип разрушения, который является распространённым и является причиной потери несущей способности во многих конструкциях. Испытания на трехточечный изгиб по методу короткой балки позволяют получить межслойное сдвиговое разрушение в условиях сложного напряженного состояния. Акустическая эмиссия – неразрушающий метод контроля, с помощью которого возможно получение данных о процессах накопления повреждений в материале [2, 3].

В работе проведены серии экспериментальных испытаний на трехточечный изгиб по методу короткой балки образцов из углепластика. Образцы делились на две группы: первая – без предварительного удара, вторая – с предварительным ударом (энергия удара 1, 3, 5, 6 Дж). Испытания были проведены при комнатной температуре на электромеханической системе Instron 5882, при скорости подвижного захвата 2мм/мин. Регистрация сигналов АЭ осуществлялась с помощью многоканальной системы AMSY-6 фирмы Vallen GmbH от начала испытания до полного разрушения образцов.

В результате были построены графики зависимости параметров сигналов акустической эмиссии от времени, совмещенные с диаграммой нагружения. Был проведен сравнительный анализ полученных данных образцов с предварительным ударом и без него. В качестве параметров АЭ были выбраны энергетический параметр сигналов, частотные характеристики и количество сигналов.

Были проанализированы полученные зависимости, описаны условия накопления и развития повреждений в материале, выявлены механизмы разрушения.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10205, <https://rscf.ru/project/21-79-10205/>.

Литература

- [1] Lobanov D.S., Lunegova E.M., Mugatarov A.I. Influence of preliminary thermal aging on the residual interlayer strength and staging of damage accumulation in structural carbon plastic. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 1, pp. 41-51. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05
- [2] Lobanov D.S. Zubova E.M. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 747. 012119. doi:10.1088/1757-899X/747/1/012119.
- [3] Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemann V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // Russian

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Чеботарева Е.А., Струнгарь Е.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
cem.chebotareva@mail.ru, cem.spaskova@mail.ru

Полимерные композиционные материалы чувствительны к повреждениям, возникающим из-за трещин в матрице, межфазного отслоения, обрыва волокон и расслаивания [1]. Данные повреждения являются опасными и приводят к потере несущей способности конструкции. Мониторинг накопления и распространения повреждений важен для оценки надежности и долговечности материалов. Современные методы экспериментальной механики позволяют проводить необходимые исследования. В научных работах исследуются механизмы разрушения композиционных материалов, а также соответствующие параметры неразрушающего контроля, например, акустической эмиссии. Так, в работах [2, 3] рассматривались энергетический параметр сигналов АЭ, пиковые частоты и количество сигналов для анализа накопления повреждений и механизмов разрушения, так как использование одного параметра АЭ для оценки распространения трещины может быть неточным и неубедительным.

В представленной работе была проведена серия механических испытаний на одноосное растяжение образцов из композиционного материала, армированного углеродными волокнами без концентраторов напряжения и с их присутствием. Образцы были изготовлены со схемой армирования $[\pm 45]_{16}$ и $[0/90]_{16}$ на основе препрега ВКУ-60 и полимерной матрицы VSE 1212 методом автоклавного формования. Концентраторы напряжения были выполнены в виде прямоугольника со скругленными углами, имели три варианта направления: 0° , 90° и 45° относительно оси нагружения. Таким образом, всего было испытано 24 образца с различными вариациями направления слоев, наличия или отсутствия, и угла поворота концентратора напряжения. Испытания проводились при комнатной температуре на электромеханической системе Instron 5882, со скоростью подвижного захвата 4мм/мин. Во время испытания осуществлялась запись сигналов акустической эмиссии с помощью многоканальной системы AMSY-6. Для синхронизации с нагружающей системой использовался блок синхронизации АЦП (NI USB-6251).

По результатам испытаний были получены и проанализированы данные с системы регистрации сигналов акустической эмиссии. На их основе построены диаграммы зависимости параметров акустической эмиссии от времени, совмещенные с диаграммой нагружения, для анализа накопления повреждений в материале с различной схемой укладки слоев и концентраторами напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-79-00113 (<https://rscf.ru/project/22-79-00113/>).

Литература

- [1] Зубова Е.М., Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 38–48. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.04.
- [2] Третьякова Т.В., Душко А.Н., Струнгарь Е.М., Зубова Е.М., Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15.
- [3] Лобанов Д.С., Лунегова Е.М., Мугатаров А.И. Влияние предварительного температурного старения на остаточную межслоевую прочность и стадийность накопления повреждений в конструкционном углепластике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. Wildemann, V.; Staroverov, O.; Strungar, E.; Lunegova, E.; Mugarov, A. Stability of Postcritical Deformation of CFRP under Static $\pm 45^\circ$ Tension with Vibrations. Polymers 2022, 14, 4502. <https://doi.org/10.3390/polym14214502>

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТЕЙНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В НЕЙ СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ

Чернышова Д.В., Иванкова Е.П., Намоконов А.Н., Евстигнеева А.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре
daracernysova744@gmail.com, jenyvany@mail.ru, namokonovsasha@mail.ru,
annka.ewstic@mail.ru

В настоящей работе представлено теоретическое исследование процесса деформирования керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней цилиндрической стальной отливки для случая отсутствия межслойного трения между двумя внутренними контактирующими слоями и его влияние на напряженное состояние оболочковой формы [1].

Решение задачи о деформировании оболочковой формы производится в два этапа. На первом этапе решается задача теплопроводности, на втором этапе – задача об определении напряженно-деформированного состояния оболочковой формы с учетом найденного поля температур.

Рассматривается осесимметричное тело вращения в виде цилиндра с закругленным зумпфом. Деформируемый материал, а именно оболочковую форму и затвердевший металл считаем изотропным. Оболочковая форма представляет собой многослойный керамический композит заданной толщины. Расчетная схема представлена цилиндрической оболочковой формой, окруженной со всех сторон опорным наполнителем и залитая жидким металлом. Внутренний слой оболочковой формы скользит относительно контактирующего с ним другого внутреннего слоя. Математическая модель такого случая описана в работе [2]. Расчетная область разбивается системой ортогональных поверхностей на элементы конечных размеров.

Для каждого элемента система соотношений записывается в разностном виде и решается по разработанному алгоритму [2] с учетом граничных условий.

Решение задачи осуществлялось численным методом [3], разработанными численными схемами с учетом программного комплекса [4].

В результате проведенных вычислительных экспериментов были получены поля температур и напряжений в оболочковой форме, анализ которых показал не состоятельность рекомендаций [1] по использованию эффекта скольжения между внутренними слоями оболочки для снижения уровня её напряженного состояния при затвердевании отливки.

Литература

- [1] Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира, 2006. - 1056 с.
- [2] Одинокое В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. и др. Влияние внутреннего фактора на трещиностойкость оболочковой формы по выплавляемым моделям // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2022. – Т.65. - №2, с. 137-144.
- [3] Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокое, Б.Г. Каплунов, А.В. Песков, А.В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
- [4] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012661389. ОДИССЕЙ / В.И. Одинокое, А.Н. Прокудин, А.М. Сергеева, Г.М. Севастьянов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.

МЕДЛЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОЖИДКОСТИ С ВНУТРЕННИМИ СТРУКТУРАМИ

Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю.

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург

d.n.chirikov@urfu.ru, A.J.Zubarev@urfu.ru

Первые теории [1] кинетики перемагничивания феррожидкостей имели дело с предельно разбавленными средами, в которых любыми взаимодействиями частиц можно пренебречь. В более поздних работах [2-4] учитывалось взаимодействие между частицами, но явлением образования гетерогенных агрегатов пренебрегалось. Физическим механизмом релаксационной зависимости намагниченности феррожидкости от магнитного поля в этих работах объясняется конечным временем переориентации частиц после изменения напряжённости магнитного поля. Характерное время этой релаксации для реальных систем имеет порядок $10^{-6} - 10^{-4}$ сек.

Как известно, в феррожидкостях частицы могут образовывать цепочечные и другие гетерогенные агрегаты. Появление таких структур существенно меняет физические, в том числе, магнитные свойства феррожидкостей. Вместе с тем время образования и разрушения этих структур намного больше времени переориентации частиц. Поэтому с этим механизмом должна быть связана релаксация намагниченности феррожидкости с намного большим характерным временем, чем время переориентации частиц.

В докладе предложена модель кинетики роста цепочечных агрегатов в феррожидкости, а также влияния этого процесса на её намагниченность. Мы рассматриваем феррожидкость, состоящую из одинаковых наноразмерных ферромагнитных частиц, объединенных в цепочечные агрегаты. Для максимального упрощения вычислений пренебрегаем другими возможными типами агрегатов (например, капельных). Цепочки рассматриваем как прямые стержнеобразные агрегаты, предполагая, что магнитные моменты частиц в цепочке направлены вдоль её оси симметрии. Предложена математическая модель эволюции ансамбля цепочек после изменения магнитного поля. Модель основана на кинетических уравнениях Смолуховского для функции g_n распределения по числу n частиц в цепочке. Учитывалось их объединение по принципу «цепочка-цепочка», а также распад вследствие теплового движения частиц. Выполнен расчет зависимости $g_n(t)$ от времени t после изменения поля. Используя эти результаты и результаты для средней намагниченности цепочки с данным числом частиц, мы рассчитали кинетику изменения намагниченности в случае скачкообразного как увеличения, так и уменьшения поля. Расчеты показали, что характерное время релаксации намагниченности в этих случаях может иметь порядок 2 – 3 секунд, что существенно больше, чем время релаксации при переориентации частиц, т. е. эволюция системы внутренних агрегатов в феррожидкости должна приводить к существенно более медленной релаксации её намагниченности, чем это рассматривалось ранее.

Литература

- [1] Шлиомис М. И. УФН. 112. 1974. – 427с.
- [2] Berkov D. V., Iskakova L. Yu., Zubarev A. Yu. Physical Review E 79. 2009. – 021407.
- [3] Ivanov A. O., Kuznetsova O. B. Physical Review E 64. 2001. – 041405.
- [4] Elfimova E. A., Iskakova L. Yu., Solovyova A. Yu., Zubarev A. Yu., Physical Review E 00. 2021. – 004600.

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА-КОЛЬСКОГО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Чудинов В.В., Соковиков М.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
chudinov@icmm.ru*

Проводилось исследование механизмов локализации пластического сдвига при динамическом нагружении на установке Гопкинсона – Кольского образцов типа сдвиг-сжатие [1], образцов специальной формы, обеспечивающих реализацию плоского деформированного состояния; образцов, в которых реализуется динамическое кручение, а также скошенных цилиндрических образцов (углы скоса $2^0, 5^0, 7^0$) [2].

Температурные поля в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Результаты изучения температурных полей не подтверждают традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью для исследуемых материалов и реализованных режимов нагружения.

Проведенные исследования позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов [3-5].

Исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № АААА-А19-119013090021-5)

Литература

- [1] Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V.101. – P. 165501(1-4).
- [2] Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Ледон Д.Р. Устройство для испытаний на сжатие образца материала на стержне Гопкинсона- Кольского // Патент на изобретение № 2773418. - 2022. - Зарегистрировано 03.06.2022. - Заявка № 2021123595 от 05.08.2021.
- [3] Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 3. – С.301-312.
- [4] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение разрушения локализованным сдвигом сплава АМг6 при статическом и динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 300-311.
- [5] Соковиков М.А., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование локализации пластической деформации в сплаве АМг6 при различных видах динамического воздействия // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – №3. – С.154-162.

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИОНОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА БИОСОВМЕСТИМОСТЬ ФОРМИРУЕМОГО КАРБОНИЗОВАННОГО НАНОСЛОЯ

Чудинов В.С.¹, Шардаков И.Н.¹, Литвинов В.В.², Иванов Я.Н.³, Солодников С.Ю.⁴

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный медицинский университет, Пермь*

³*Пермский государственный университет, Пермь*

⁴*Пермский государственный технический университет, Пермь*

chudinov.v@icmm.ru

Любой искусственный эндопротез при вживлении в организм пациента вызывают реакцию на инородное тело, которая характеризуется воспалительным процессом - инициализацией системы комплимента, активацией клеток иммунной системы таких, как гранулоциты и макрофаги, и формированием гигантских клеток инородных тел. Т.к. размеры имплантатов во много раз превышают размеры клеток и выполнены из стабильных материалов, разрушение на молекулы которых происходит в течение десятилетий и более, вокруг эндопротеза формируется изолирующая соединительно-тканная капсула. Однако существуют высокие риски отторжения имплантата: возникновение острого воспаления, влияющего на макроорганизм, хронического воспаления, формирование толстой плотной коллагеновой капсулы, нарушающей функциональность эндопротеза, и кальцификация этой капсулы. Первопричиной реакции на инородное тело является изменение конформации в первом слое адсорбированных белков на поверхности имплантата, и, как следствие, происходит инициализация системы комплимента [1].

В данной работе исследуется реакция организма лабораторных крыс на мягкие полиуретаны, обработанные высокоэнергетическими ионами азота из плазмы тлеющего разряда. После ионно-плазменной обработки на поверхности полимеров формируется гидрофильный карбонизованный нанослой, обладающей активностью из-за наличия в его структуре стабилизированных неспаренных электронов [2]. Уникальные свойства карбонизованного нанослоя позволяют ковалентно связывать белки организма на его поверхности и сохранять их активность и конформацию [3]. Гистологические результаты показывают, что плотность распределения гранулоцитов вокруг имплантатов, обработанных плазмой, в 2-9 раз меньше, чем вокруг необработанных полиуретанов. Коллагеновая капсула вокруг обработанных плазмой полиуретанов в 1,5-2 раза тоньше, чем вокруг необработанных имплантатов. Однако вокруг имплантатов с карбонизованным нанослоем, сформированным при самой высокой дозе ионов и характеризующейся наиболее твердой поверхностью, толщина коллагеновой капсулы увеличивается при более длительной экспозиции имплантата в организме. Из этого следует вывод, что существуют пороговые значения режимов плазменной обработки, при которых ухудшаются свойства обработанной поверхности. Возможно, что это происходит по причине механического воздействия поверхности имплантата на окружающие ткани.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-48-596014 р_НОЦ_Пермский край и в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН.

Литература

- [1] Агапов И.И. и др. Биосовместимые материалы. Под ред. Севастьянова В.И., Кирпичникова М.П. – Москва: МИА, 2011. – 537 с.
- [2] Рэнби Б. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. Перевод с англ. В.Б. Иванова. Под ред. Н.М. Эмануэля. – Москва: Мир, 1978. – 675 с.
- [3] Кондюрина И.В., Чудинов В.С., Терпугов В.Н. и Кондюрин А.В. Химическая пришивка альбумина на поверхность полиуретанового имплантата, модифицированного ионным пучком // Медицинская техника. – 2018. – № 4. – С. 19-21.17.

О РОЛИ СЖИМАЕМОСТИ В УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТОРЕ

Чупин А.В.^{1,2}, Машкина А.К.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

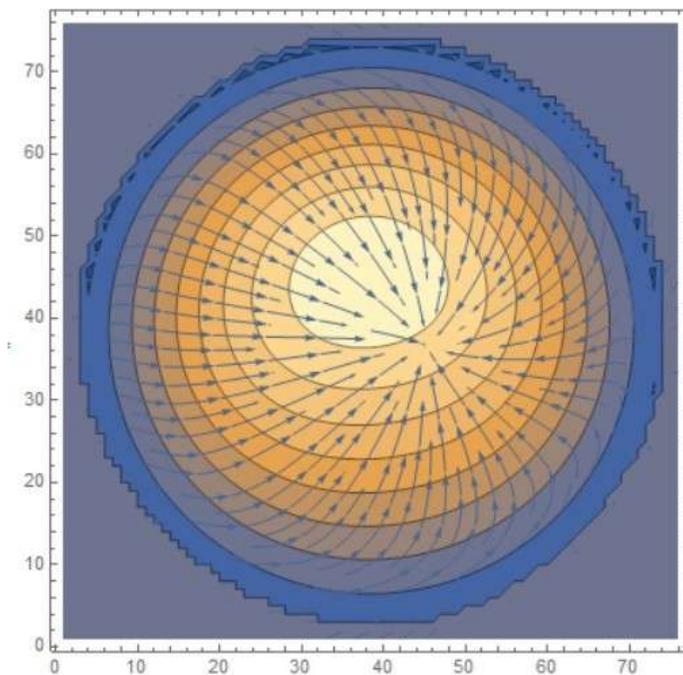
chupin@icmm.ru

Устойчивость течения несжимаемой жидкости внутри тороидального канала представляет собой сложную и интересную задачу ввиду разнообразия возникающих режимов. [1]

В работе численно исследована линейная устойчивость ламинарного течения жидкости в тороидальном канале в зависимости от интенсивности течения (Re) и кривизны канала (κ). Для этого на стационарное течение накладывается малые возмущения в виде белого шума и отслеживается их эволюция с течением времени. Предполагается, что должны выделиться наиболее быстро растущие (или наиболее медленно затухающие) гармоники, которые при малых Re обычно бывают монотонными. Однако при этом возникают две трудности. Во-

первых, заранее неизвестно исследуемое течение (нет аналитической формулы). Это приходится решать итеративно, дополнительно предвычисляя течение для каждого набора параметров. Во-вторых, использование модели жидкости с искусственной сжимаемостью (уравнение $\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\nabla \cdot \bar{v}}{\gamma}$) существенно влияет на эволюцию течения – возникают плохо затухающие волны давления (см. мгновенный снимок на рисунке). В работе эта проблема решается введением обычно игнорируемой второй вязкости.

В результате удалось получить инкременты затухания возмущений для Re до 100.



Литература

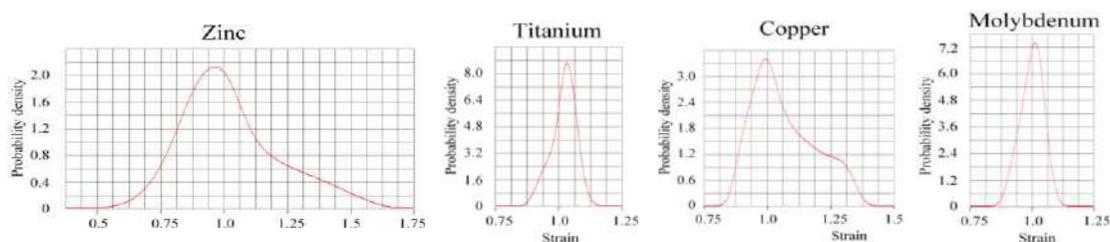
[1] I. D. Piazza, M. Ciofalo, Transition to turbulence in toroidal pipes. – Journal of Fluid Mechanics. – V. 687. – Pp. 72–117. – 2011.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Шавшуков В.Е.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
shavshukov@pstu.ru

Знание распределения полей упругих деформаций и напряжений в зернах поликристаллических материалов имеет большое значение для анализа различных локальных критических событий, таких как возникновение повреждений и т. д. Многие экспериментальные и расчетные исследования предполагают, что эти распределения могут быть аппроксимированы нормальным распределением. Параметры нормального распределения восстанавливаются по гистограммам, полученным в эксперименте или с помощью компьютерного моделирования. Эти фитинги основаны на довольно ограниченном количестве образцов материалов или цифровых моделей случайных микроструктур поликристаллов. Большинство опубликованных гистограммных распределений имеют ярко выраженную асимметрию, в отличие от нормального распределения. Здесь представлен метод вычисления плотностей вероятности упругих деформаций на основе очень большой статистической выборки. Это важно для восстановления хвостов распределений, ответственных за большие флуктуации деформации. Доказана негауссовость распределений. В методе используется интегральное уравнение для деформаций неоднородных тел [1, 2]. Основное внимание уделяется влиянию случайных взаимодействий зерен на распределение деформации. Расчеты проведены для поликристаллов с различной упругой симметрией зерен. На рисунке представлены плотности вероятностей распределения продольных (вдоль нагрузки) деформаций при одноосном растяжении. Деформации по оси абсцисс даны в относительных единицах (деленных на макродеформацию). Все плотности вероятностей конечны и асимметричны. Показано, что очень немногие выгодно расположенные соседние зерна (из десятков) оказывают гораздо более выраженное влияние на предельные значения деформации, чем все остальные.



Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0006).

Литература

- [1] Shavshukov V., Tashkinov A. Quantum Field Theory Approach to Mechanics of Polycrystals // Solid State Phenom. – 2015. – V.243. – P. 131-138.
- [2] Tashkinov A.A., Shavshukov V.E. Inhomogeneities in grains of polycrystalline materials and Eshelby problem // PNRPU Mechanics Bulletin. - 2018. - №1. - С. 58-72.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРОВИ ИЛИ СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ?

Шакиров Н.В.¹, Судаков А. И.¹

¹*Институт механики сплошных сред, Пермь*
shakirov@icmm.ru, sudakov@icmm.ru

В последние годы в исследованиях по реологии крови достигнут значительный прогресс не только с точки зрения разработки точных и информационных методов, но и с точки зрения понимания явлений, связанных с компонентами крови, их взаимодействием и влиянием на свойства крови. В [1] подробно рассмотрены реологические и физиологические параметры крови и их влияние на кровообращение. Цельная кровь представляет собой многофазную жидкость, состоящую из взвешенных в плазме клеточных элементов, водного раствора органических молекул, белков и соли. Клеточная фаза крови включает эритроциты, лейкоциты и тромбоциты. Плазма является ньютоновской жидкостью. Её вязкость зависит от концентрации белков, но не изменяется при различных скоростях сдвига. Нормальная плазма при 37 градусах Цельсия имеет вязкость $1.2 - 1.3 \text{ Мпа} \cdot \text{сек}^{-1}$, но эти значения могут быть выше при различных воспалительных и сердечно-сосудистых заболеваниях. Реологические свойства крови зависят от взаимодействия и механических свойств эритроцитов, уровня холестерина и фибриногена [2]. Наибольшее влияние на реологию оказывают эритроциты благодаря их высокому содержанию (более 40%) в плазме. При этом влияние гематокрита на вязкость крови намного выше при низких скоростях сдвига (например, при течении в венах), чем при высоких скоростях (в артериях). Большая часть реологических измерений была выполнена в условиях стационарного сдвигового течения цельной крови. Гораздо меньше исследований, посвящённых изучению поведения крови в нестационарных потоках [3]. В данной работе проводится сравнение результатов, прогнозирующих реологическое поведение крови различными уравнениями состояния. Анализируются результаты измерений упругих свойств крови. Особое внимание уделяется поведению крови при течении с низкими скоростями сдвига, меньших одной десятой.

Литература

[1] Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрин Н.Х. Реология крови. М.- «Медицина», 1982, 272 с.

[2] Zydney A. L., Oliver J. D., Colton C. K. A constitutive equation for the viscosity of stored red cell suspensions: Effect of hematocrit, shear rate, and suspending phase. Journal of Rheology. 1991, v.35, P.1639-1680.

[3] Sousa P.C., Fernando T., Pinho F.T., Alves M.L., Oliveira M.S. Korea-Australia Rheology Journal, 2016, v.28, №1, P. 1-22.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА МНОЖЕСТВЕННЫХ ТРЕЩИН В СТРУКТУРЕ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА XFEM

Шалимов А.С., Ташкинов М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
Shalimov96@pstu.ru, M.Tashkinov@pstu.ru

Исследование механического поведения костей является особым направлением в современной биомедицине. Как правило, необходимо полностью определить механическую реакцию кости на внешние факторы, чтобы иметь возможность защитить или укрепить любую часть опорно-двигательной системы человека за счет искусственных устройств. Механическое поведение кости играет ключевую роль в определении ее прочности, надежности и долговечности, поскольку в любом материале, включая органические, при различных условиях могут возникать такие дефекты, как микротрещины. Анализ случаев возникновения трещин в костях и предельных нагрузок, связанных с разрушением кости, позволяет разработать требования к костным имплантатам. Поэтому важно изучать механическое поведение костей на различных масштабах длины. Трабекулярные кости с их открытоячеистой структурой с поровыми каналами и твердофазной сетью лигаментов, несущих нагрузку, представляют собой сложную задачу для такого анализа.

В данной работе рассматриваются элементарные объемы трабекулярной кости как случайный пористый композитный материал, механическое поведение которого исследуется численно. Стохастическая природа этих объемов связана с внутренней микроструктурой кости. Поведение костей при разрушении численно изучается с применением подходов линейно-упругой механики разрушения с использованием расширенного метода конечных элементов (XFEM), реализованного в прикладном пакете SIMULIA Abaqus. Разрушение реализуется с помощью моделирования роста множественных трещин в отдельных лигаментах элементарного объема трабекулярной кости при использовании пользовательского полуавтоматического алгоритма, включающего кластеризацию подобластей.

Изучено влияние микроструктурной морфологии на напряженно-деформированное состояние и процессы разрушения в элементарном объеме трабекулярной кости при различных комбинациях приложенных механических нагрузок. Области локализации инициации разрушения наблюдаются в концентраторах напряжений - тонких связках структуры. Для анализа разрушения отдельных лигаментов использовалась функция доли площади поверхности трещины к площади сечения лигамента.

РАЗРАБОТКА АКТУАТОРА ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В.

Институт механики сплошных сред, Пермь

shardakov@icmm.ru, shap@icmm.ru, glot@icmm.ru, epin.v@icmm.ru, flower@icmm.ru

В процессе эксплуатации сложных инженерных конструкций могут возникать аварийные ситуации. Их предотвращение может быть реализовано с помощью систем деформационного мониторинга. Одним из вариантов таких систем является метод активной вибродиагностики конструкций. Он заключается в локальном динамическом воздействии на конструкцию и регистрации ее вибрационного отклика. Совокупность откликов от воздействий в различных точках позволяет определить механическое состояние конструкции. Согласно этому методу, динамические воздействия реализуют актуаторы. Они могут быть различных видов: маятниковые, электромагнитные, пьезокерамические. В сравнении с другими видами, пьезокерамические актуаторы обладают следующими достоинствами. В их конструкции как правило нет трущихся и ударно взаимодействующих частей. Это обеспечивает высокую надежность и точность воспроизведения сигналов. Они позволяют реализовать импульсные и гармонические воздействия, основная частота которых может изменяться в процессе выполнения диагностических процедур. Также они позволяют создавать высокочастотные (ультразвуковые) сигналы.

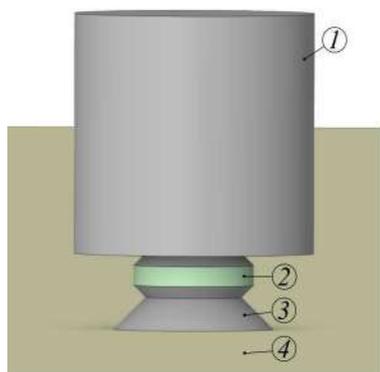


Рис.1 Схема актуатора:
1– груз, 2– пьезокерамика,
3– адаптер, 4– бетонная плита

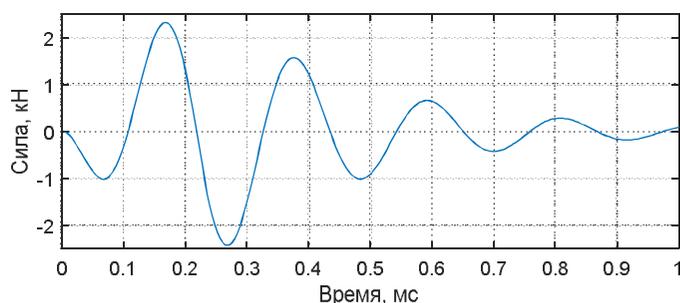


Рис.2 Сила, создаваемая актуатором

В этом исследовании выполнена разработка пьезокерамического актуатора для бетонной плиты толщиной 100 мм, создающего колебания в частотном диапазоне 4-6 кГц. Его схема показана на рисунке 1. На основе проведенных расчетов определена оптимальная масса груза, которая составляет 1.3 кг. Такой актуатор реализует импульсное силовое воздействие изображенное на рисунке 2. В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы. Максимальные силовые характеристики актуатора достигаются на частотах близких к резонансной частоте механической системы актуатор – конструкция. Резонансная частота этой системы может регулироваться величиной груза, присоединенного к пьезокерамике. Напряженность электрического поля прикладываемого к пьезокерамике должна быть сонаправлена с вектором поляризации пьезокерамики. В этом случае реализуются растягивающие напряжения в 2 раза меньше чем сжимающие. С учетом того что прочность пьезокерамики на сжатие существенно выше чем на растяжение, такая поляризация является предпочтительной. Конструкция сопряжения пьезокерамики с грузом и адаптером имеет важное значение. Коническое сопряжение, предложенное в данной работе, позволяет убрать концентраторы напряжения и снизить уровень растягивающих напряжений в 4 раза.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК В МНОГОУРОВНЕВОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
elvira16_90@mail.ru*

Использование деформирования в режиме структурной сверхпластичности (СП) при умеренно повышенных температурах является перспективным направлением развития технологий изготовления металлических изделий сложной формы с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, позволяющим снизить нагрузки на обрабатываемые инструменты и число операций финишной обработки. Для указанных температур даже при одноосном растяжении кривые демонстрируют стадийность (колоколообразность), что связано с действием и взаимодействием различных механизмов, а также сменой их ролей [1]. На основе анализа результатов многочисленных исследований определено, что зернограничное скольжение (ЗГС) и внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС) являются основными механизмами (ЗГС лидирует в режиме структурной СП), весьма существенны процессы зернограничной диффузии, динамической рекристаллизации (ДР), ротаций решеток кристаллитов.

Ранее авторами была предложена многоуровневая конститутивная модель [1, 2], позволяющая описывать эволюционирующую структуру материала и учитывающая перечисленные выше механизмы и их взаимодействия. Одной из важных задач по совершенствованию разработанной модели является более детальный учет исходной структуры материала на различных масштабах и ее изменения в процессе деформирования. Для этого были проанализированы закономерности поведения некоторых алюминий-магниево-цинковых сплавов при СП деформировании в зависимости от их структуры. Установлено, что в сплавах содержатся различные типы частиц, которые оказывают значимое влияние на ВДС, ЗГС и ДР. Соотношения модели модифицированы путем учета эволюции распределений малых прочных частиц Al_3Zr и непрочных частиц Al_3Li , а также их влиянием на основные механизмы СП деформирования.

Предложенная модель была использована для исследования процессов простого и сложного нагружения поликристаллического алюминиевого сплава 1420. Установлено, что модель позволяет описать наблюдаемые в экспериментах закономерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

[1] Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И. Многоуровневая модель для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических материалов // Физическая мезомеханика. 2019. Т.22. № 2. С. 5–23.

[2] Shveykin A.I., Trusov P.V., Sharifullina E.R. Statistical crystal plasticity model advanced for grain boundary sliding description // Crystals. 2020. V. 10. № 9. – 18 p.

О КОМПЛЕКСНОЙ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
shveykin@pstu.ru*

Для совершенствования существующих и разработки новых методов термомеханической обработки металлов и изделий целесообразно применять многоуровневые конститутивные модели (КМ) материалов, позволяющие явным образом описывать механизмы неупругого деформирования и перестроение структуры материала, а следовательно, изменение определяемых ее состоянием физико-механических свойств [1]. Это дает возможность проектирования процессов производства функциональных материалов-изделий [1].

Поскольку стохастический характер имеют как характеристики свойств материала на всех структурно-масштабных уровнях, так и воздействия, продуцируемые стохастическими граничными условиями, актуально исследование получаемых с использованием КМ решений (истории изменения откликов) по отношению к возмущениям входных данных (истории воздействий и начальных условий) и оператора.

Было введено определение устойчивости решения, в отличие от традиционного учитывающее возможные возмущения истории изменения воздействий и возмущения оператора, осуществляемые в разные моменты в течение всего рассматриваемого времени процесса [2]. Предложена методика численной оценки устойчивости многоуровневых конститутивных моделей [2], основанная на интегральной оценке отклонения отклика при рассмотрении разнообразных возмущений начальных условий, истории воздействий, оператора, и определении интегральной нормы отклонения получаемых решений от базовых. Данная методика была апробирована на базовой двухуровневой статистической КМ ГЦК-поликристалла (меди), установлена устойчивость рассматриваемых решений [3].

На следующем этапе работы методика была применена для исследования более сложных многоуровневых КМ, в частности, трехуровневой КМ, включающей описание зернограничного проскальзывания и режима сверхпластического деформирования. Результаты проведенных численных экспериментов свидетельствуют об устойчивости многоуровневых КМ. На основе результатов анализа математической структуры моделей установлены причины отсутствия неустойчивых решений при рассматриваемых условиях, предложено физическое обоснование этого.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.
- [2] Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. Об одном подходе к численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, №1. – С. 61-76.
- [3] Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. Некоторые результаты численной оценки устойчивости двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 127-143.

«МАГНИТОВЯЗКИЙ» ЭФФЕКТ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ И БИДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Шельдешова Е.В., Ряполов П.А.

*Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия
blackberry__@mail.ru*

В данной работе представлены результаты исследования «магнитовязкого» эффекта магнитной жидкости, левитирующей в однородном магнитном поле электромагнита, испытывающего колебательный сдвиг [1,2]. Рассмотрено влияние наночастиц магнетита на реологические свойства магнитных жидкостей. Магнитные жидкости являются коллоидным раствором наночастиц магнетика, покрытых поверхностно-активным веществом, диспергированных в жидкость-носитель.

Бидисперсные магнитные системы готовили путем механического и ультразвукового смешивания наночастиц магнетита 1%, 5% и 10% по массе твердой фазы с магнитной жидкостью. Такие системы обладают коллоидной стабильностью, но при этом их вязкость и теплопроводность изменяются под влиянием внешнего магнитного поля [3]. Мы исследовали зависимость «магнитовязкого» эффекта для бидисперсных магнитных систем, совершающих колебания в магнитном поле. Показано, что такие системы показывают увеличение значения вязкости в зависимости от количества частиц железа, содержащиеся в магнитной жидкости. Чем больше содержание массовой доли крупных частиц магнетита, тем выше вязкость в пристеночном слое. Еще одной важной характеристикой магнитных жидкостей является зависимость вязкости от температуры. В процессе эксперимента по исследованию «магнитовязкого» эффекта магнитной жидкости в зависимости от изменения температуры показано, что вязкость растет с увеличением напряженности магнитного поля и снижается с увеличением температуры.

Наличие информации по «магнитовязкому» эффекту позволяет получить достаточно полную картину о физических механизмах колебательного движения магнитожидкостных активных элементов в различных технических устройствах, в частности, использования магнитных жидкостей в устройствах по демпфированию вибраций. При использовании «магнитовязкого» эффекта, наблюдающегося в тонком пристеночном слое в условиях наложения на колеблющуюся магнитную жидкость сильного магнитного поля, в перспективе имеются возможности для диагностики межчастичного агрегирования.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213) в рамках реализации государственного задания (№ 0851-2020-0035).

Литература

- [1] Ryapolov P. A., Polunin V. M., Shel'deshova E. V. An alternative way to study magnetic fluid magnetization and viscosity //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 496. – С. 165924.
- [2] Polunin V. M. et al. Viscosity of a Magnetic Fluid in a Strong Magnetic Field //Acoustical Physics. – 2019. – Т. 65. – №. 4. – С. 379-384.
- [3] López-López M. T. et al. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2006. – Т. 18. – №. 38. – С. S2803.

РЕЖИМ ОБУХОВА-БОЛДЖИАНО В ВЫНУЖДЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Шестаков А.В.¹, Степанов Р.А.¹, Фрик П.Г.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
shestakov@icmm.ru, rodion@icmm.ru, frick@icmm.ru.

Известно, что в неизотермической турбулентности возможны два режима обмена энергией между вихрями разного масштаба. Это режим Колмогорова, при котором пульсации температуры малы по сравнению со средней температурой среды и переносятся по спектру как пассивная примесь. В этом случае для спектральной плотности энергии пульсаций скорости и температуры реализуются степенные законы «-5/3». На возможность другого режима было указано в работах [1,2]. В литературе он получил название режима Обухова-Болджиано. При реализации этого режима пульсации температуры оказывают существенное влияние на динамику каскадных процессов. В этом случае спектральная плотность энергии пульсаций скорости и температуры подчиняются законам.

$$\begin{aligned} E(k) &= C_1 \varepsilon_T^{2/5} (g\beta)^{4/5} k^{-11/5}, \\ E_\theta(k) &= C_2 \varepsilon_T^{4/5} (g\beta)^{-2/5} k^{-7/5}. \end{aligned} \quad (1)$$

До настоящего времени, условия, при которых наблюдается (1), однозначно не сформулированы, а класс течений, в котором бы он реализовывался, не определен.

В работе проведено теоретическое исследование уравнений баланса энергии турбулентных пульсаций для вынужденной стационарной турбулентности в стратифицированной неизотермической среде. Получены количественные соотношения, определяющие разные режимы каскадного переноса энергии пульсаций скорости и температуры по спектру. Получен параметр, величина которого является определяющей для реализации разных режимов. Подробно исследованы решения уравнений баланса для различных значений этого параметра. Определен диапазон значений параметра, в котором решения уравнений баланса энергии соответствуют режиму Обухова-Болджиано.

Для проверки теоретических выводов, выполнено численное моделирование вынужденной турбулентности в стратифицированной неизотермической среде с помощью каскадной модели.

$$\begin{aligned} \frac{dU_n}{dt} &= W_n(U, U) - \nu k_n^2 U_n - g\beta T_n + f_n^U \\ \frac{dT_n}{dt} &= W_n(U, T) - \chi k_n^2 T_n + f_n^T. \end{aligned} \quad (2)$$

Где $W_n(U, T)$ - квадратичная форма, моделирующая нелинейные слагаемые в уравнениях Навье-Стокса и уравнении теплопроводности. Расчеты подтвердили справедливость выводов, сделанных из теоретического анализа решений уравнений баланса энергии. Кроме того, было показано, что режим Обухова-Болджиано теряет свою устойчивость из-за нарушения стратификации среды, которая является необходимым условием его существования.

Литература

- [1] Обухов А.М. О влиянии архимедовых сил на структуру температурного поля в турбулентном потоке – Доклады АН СССР, 1959. – Т. 125. – N. 6. – С. 1246-1248.
[2] Bolgiano R. Turbulent spectra in a stably stratified atmosphere – J. Geophys. Res, 1959. – V.46. – N.12. – P.2226-2229.

ВЫСШИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ МЕТОДА ОСРЕДНЕНИЯ

Шешенин С.В., Артамонова Н.Б.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва
sergey.sheshenin@mail.ru, artamonovanb@mail.ru

Методика асимптотического осреднения была разработана для трехмерных уравнений в частных производных с быстро осциллирующими коэффициентами. В основном она применялась в первом приближении и использовалась для вычисления эффективных свойств. Затем она была модифицирована для тонких тел (однородных или неоднородных, с ровными лицевыми поверхностями или нет), описываемых трехмерной теорией упругости. Методика осреднения в таком случае также понижает размерность задачи, т.е. сводит трехмерную краевую задачу к некоторой двумерной. В данной работе рассматриваются два новых применения методики осреднения: 1) к задаче получения уравнений сильно ортотропных пластин, 2) к задаче получения осредненных уравнений метаматериалов. В первом случае используются три приближения метода, во втором два. Приводится обоснование применения метода к задаче с двумя малыми параметрами в случае сильно ортотропной пластины. Кроме толщины, малым параметром является отношение поперечных модулей упругости к модулям в плане пластины. Показано, что сильная ортотропия приводит к увеличению толщины эквивалентной пластины и изменению жесткостей.

Первое асимптотическое приближение дает классическую теорию Кирхгофа, а третье приближение совпадает с теорией Амбарцумяна (Редди). Рассмотрение цилиндрического изгиба дает возможность найти решения в рамках классических теорий пластин в виде формул так же, как и три приближения асимптотической теории, что удобно для сравнения. Асимптотический анализ не связан с какими-либо гипотезами и приводит к последовательности двумерных задач в области пластины и одномерных локальных в поперечном направлении задач. Три асимптотических приближения не заменяют классические теории пластин, но сравнение представляется интересным для сильно ортотропных пластин. В частности, сравнение распределения напряжений в плане пластины и в поперечном направлении может оказаться полезным при построении конечных элементов для однородных и слоистых пластин.

Численное сравнение с классическими теориями пластин проведено для классических полимерно-волоконистых композитов и для резинокордного слоя. Последний пример наиболее интересен, поскольку распределение нормальных напряжений в плане существенно отличается от линейного, что предполагается в теориях Кирхгофа и Рейснера. Проведена аналогия осреднения пластин и получение асимптотическим методом градиентной теории упругости. Показано, что, вообще говоря, при трехмерном описании резинокордного слоя следует использовать моментную теорию упругости взамен классической. Иллюстрация дана на примере сильного деформирования пневматической шины. Кратко описано реономное поведение брекерной резины, полученное в экспериментах. Также рассмотрена связь поворота и растяжения, описываемая в литературе по метаматериалам. Показано, что в отличие от пластин, свойство связанности может проявляться только при локальном воздействии. Теоретический вывод подтвержден конечно-элементными расчетами. Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса» и Минобрнауки России в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению №075-15-2022-284.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСРЕДНЁННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ АТТРАКТОРОМ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ

Ширяева М.А., Субботин С.В.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
shiryayeva_ma@pspu.ru, subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуется динамика жидкости в неравномерно вращающемся (либрирующем) цилиндре, торцы которого параллельно наклонены относительно оси вращения на угол α . Вариации скорости вращения возбуждают пульсационное движение в объеме полости в виде инерционных волн, при этом наличие наклонных стенок является достаточным условием для фокусировки волн в аттрактор [1]. В докладе особое внимание уделяется диапазону частот либраций, соответствующему аттрактору (1,1), имеющему форму параллелограмма (рис.1, *a*). Исследование мгновенного поля скорости показало, что в системе отсчета полости волновой аттрактор возникает только на долю периода либраций. Обнаружено, что вблизи точек отражения ветвей аттрактора от наклонных стенок возникает осреднённая циркуляция. Это приводит к тому, что вдоль оси формируется система вытянутых вдоль оси вращения осреднённых азимутальных структур (рис.1, *b*). Отражение инерционных волн от боковых стенок также приводит к возникновению осреднённого течения в динамическом пограничном слое Стокса (рис.1, *c*). В отличие от цилиндра с прямыми торцами [2] осреднённые структуры в пограничном слое являются неосесимметричными. С увеличением частоты либраций точка отражения аттрактора от боковой границы смещается к тупому углу полости, что приводит к соответствующему изменению положения осреднённых вихрей [3]. В докладе обсуждается динамика вихревых структур в зависимости от частоты, амплитуды либраций и числа Экмана.

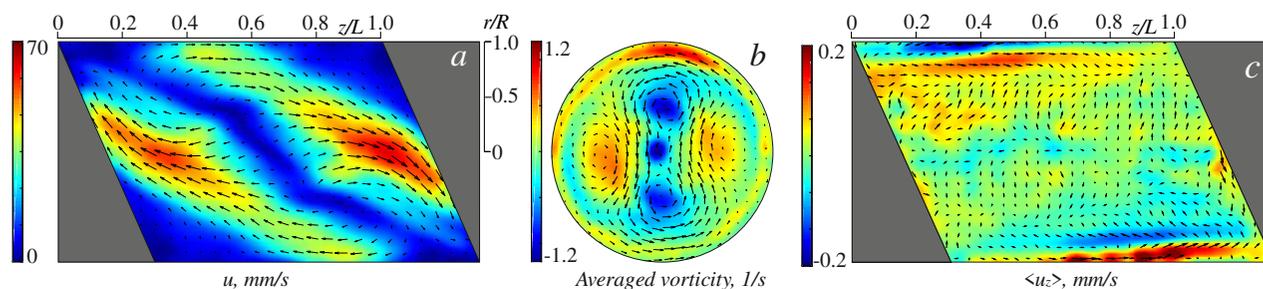


Рисунок 1 – Аттрактор инерционных волн (1,1) и соответствующее осреднённое течение при $\Omega_{lib} / \Omega_{rot} = 0.90$, $\varepsilon = 0.05$, $E = 4.7 \cdot 10^{-4}$: (а) мгновенное поле скорости в фазе $\Omega_{lib} t = 0$; (б) осредненное поле завихренности в поперечном сечении полости $z / L = 0.5$; (с) осредненное поле скорости вдоль оси z

Литература

- [1] Manders A.M.M., Maas L.R.M. Observations of inertial waves in a rectangular basin with one sloping boundary // J. Fluid Mech. – 2003. – V. 493. – P.59–88.
 [2] Subbotin S.V., Dyakova V.V. Inertial Waves and Steady Flows in a Liquid Filled Librating Cylinder // Microgravity Sci. Technol. – 2018. – V. 30. – P. 383–392.
 [3] Subbotin S.V., Shiryayeva M.A. Steady Vortex Flow Induced by Inertial Wave Attractor in a Librating Cylinder with Sloping Ends // Microgravity Sci. Technol. – 2022. – V. 34. – P 89.

МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРОВ ДРОБНОГО ПОРЯДКА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Шитикова М.В.

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

Данная работа посвящена анализу научных исследований, выполненных за последние 10 лет и касающихся приложений дробного исчисления (исчисления дробного порядка) в моделях линейной вязкоупругости, используемых в динамических задачах механики деформируемого твердого тела. Дан краткий исторический обзор, отражающий вклад советских механиков в развитие наследственной механики. Проанализированы различные модели вязкоупругих материалов, построенные с помощью дробных производных, как без учета, так и с учетом объемной релаксации. Показано, что модели, в которых оператор Пуассона зависит от времени, позволяют описать свойства вязкоупругих ауксетиков, то есть материалов с отрицательными коэффициентами Пуассона.

Исследования проводились при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00634).

Литература

- [1] Шитикова М.В. Обзор вязкоупругих моделей с операторами дробного порядка, используемых в динамических задачах механики твердого тела // Известия РАН. Механика твердого тела. 2022. № 1. С. 3-40.
- [2] Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics: Novel trends and recent results // Applied Mechanics Reviews. 2010. Vol. 63, № 1. PaperID 010801.
- [3] Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Fractional calculus models in dynamic problems of viscoelasticity // Handbook of Fractional Calculus with Applications. 2019. Vol. 7. P. 139-158.
- [4] Shitikova M.V., Krusser A.I. Models of viscoelastic materials: a review on historical development and formulation // Advanced Structured Materials. 2022. Vol. 175. P. 285-326.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ В ИНДУКЦИОННОМ НАСОСЕ ПОСРЕДСТВОМ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Шмаков Е.И., Смольянов И.А.

Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург

shmakov.evgeny@urfu.ru, i.a.smolianov@urfu.ru

В работе представлены результаты моделирования магнитогидродинамических (МГД) течений в индукционном насосе. Основная проблема моделирования подобных установок – это необходимость проведения связанных электромагнитных и гидродинамических расчетов. Подобные связи реализованы в некоторых коммерческих пакетах, например *Comsol Multiphysics* и *Ansys*. Преимущество *Ansys* заключается в использовании метода конечных объемов, так как данный метод демонстрирует более стабильный ход решения с точки зрения сходимости задачи. Но в качестве альтернативы коммерческим пакетам есть возможность использования свободного программного обеспечения. В данном исследовании применялись пакеты *Elmer* и *OpenFoam* с помощью библиотеки связи *EOF-library* [1]. Объектом исследования является индукционный насос для перекачки жидкого магния [2]. В качестве результатов представлено сравнение расходно-напорных характеристик полученных в работе [2] и с помощью расчета в свободном программном обеспечении. Также в качестве дополнительных исследований демонстрируется сравнение нескольких подходов к моделированию МГД течений: учитывается неоднородность поля скорости при расчете распределения электромагнитного поля, поле скоростей рассматривается однородным при расчете электромагнитного поля и расчет усилия производится только для пускового режима, а с увеличением скорости жидкости пересчет электромагнитного усилия не

производится. Полученные расходно-напорные характеристики показаны на Рис. 1. Из расходно-напорных характеристик видно, что учет неравномерности поля скоростей и ее влияния на распределение электромагнитного усилия оказывает значительный эффект при увеличении значения расхода жидкости. Также в работе исследовалось изменение характера течений от режима работы насоса. Наблюдались сильные турбулентные течения в пусковом режиме и расширение активного сечения канала при увеличении расхода жидкости.

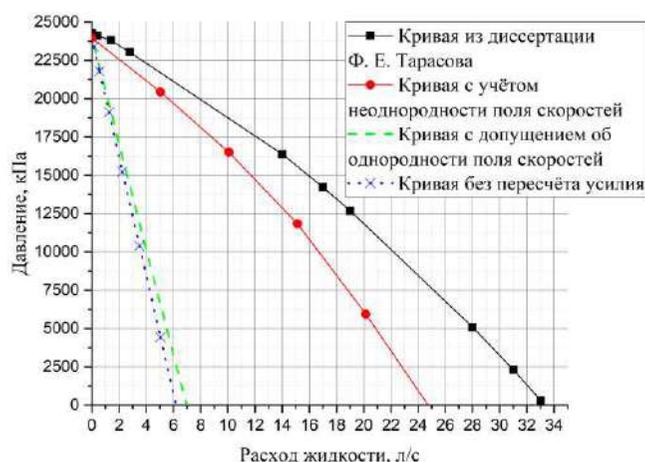


Рисунок 1 – Сравнение расходно-напорных характеристик

Литература

- [1] Vencels J., Råback P., Geža V. EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics // SoftwareX. – 2019. – Vol. 9. – P. 68–72.
- [2] Тарасов Ф.Е. Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния: дис. канд. техн. наук: 05.09.01. Екатеринбург: Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. стр. 148.

ВЛИЯНИЕ ЖИДКОЙ ФРАКЦИИ ПЕНЫ НА ОБТЕКАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПРОНИЦАЕМОГО ПРЕПЯТСТВИЯ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ- ШОУ

Шмакова Н.Д.¹, Стенникова О.Е.^{1,2}, Карра Ж.-Б.¹, Ерманюк Е.В.¹

¹ *Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

shmakova@hydro.nsc.ru

Жидкие пены представляют собой многомасштабную структуру газовых пузырьков в жидкой фазе. Неоднородное строение пены приводит к сложному реологическому поведению: в зависимости от вида и параметров внешнего воздействия могут одновременно проявляться упругие, пластические и вязкие свойства пен [1, 2]. Такое сложное поведение пен используется во многих промышленных приложениях [3], как для повседневного применения, например, в продуктах и технологиях пищевой, косметической и фармацевтической промышленности, так и в крупномасштабных промышленных процессах, таких как добыча руды, восстановление почв, нефтедобыча. В этих приложениях понимание закономерностей, позволяющих осуществлять контроль течений пен в гетерогенных средах, представляется чрезвычайно важным [4].

Ранее в работе [5] было рассмотрено влияние геометрии проницаемого препятствия на квазидвумерное течение пены в ячейке Хеле-Шоу, состоящей из двух стеклянных пластин, разделенных миллиметровым зазором. Целью настоящей работы является анализ экспериментальных данных квазидвумерного течения пены с различным водосодержанием при наличии проницаемого цилиндрического препятствия, частично перекрывающего зазор ячейки. В работе представлен новый алгоритм оценки величины жидкой фракции двумерной пены на основе статистического анализа данных, полученных с помощью оптических методов визуализации течения. Показано, что повышение водосодержания приводит к уменьшению эффекта отрицательного следа при обтекании препятствия в плоской щели. Для более сухих пен увеличение высоты препятствия приводит к усилению эффекта отрицательного следа. Проницаемость локального препятствия значительно уменьшается с увеличением жидкой фракции в исследуемом диапазоне параметров и падает до значения, близкого к нулю, при переходе к пузырьковому течению [6].

Литература

- [1] Weaire, D. The Physics of Foams. Oxford University Press, 1999.
- [2] Hohler, R. & Cohen-Addad, S. Rheology of liquid foams // J. Phys. Condens. Matter 2005. V. 17. R1041–R1069.
- [3] Khan, S. A. & Prud'homme, R. Foams. Dekker, 1996.
- [4] Cantat, I. Foams, Structure and Dynamics. Oxford University Press, 2013.
- [5] Shmakova N.D., Chevalier, T., Puisto, A., Alava, M., Raufaste, C., Santucci, S. Quasi-two-dimensional foam flow through and around a permeable obstacle // Phys. Rev. Fluids. 2020. V.5. 93301
- [6] Stennikova, O., Shmakova, N., Carrat, J.-B., Ermanyuk, E. Liquid Fraction Effect on Foam Flow through a Local Obstacle // Polymers. 2022. V. 14. 5307.

ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ РЕАКЦИИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ С МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕЙ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЕРЕГРУЗОК

Шмыров А.В.^{1,2}, Денисова М.О.^{1,2}, Мизёв А.И.^{1,2}

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

Alex.Mizev@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния гравитационной конвекции на пространственную структуру и скорость протекания реакции нейтрализации. Обычно эту реакцию изучают в системе водных растворов реагентов, что подразумевает единое пространство, в котором возможен массоперенос как исходных реагентов, так и продукта реакции. Но возможна ситуация, когда растворители у реагентов будут образовывать двухслойную систему благодаря разной полярности, такое возможно, например, в системе вода - органическая жидкость. Сами реагенты (кислота и щёлочь) при этом выбираются неорганическими, что позволяет исключить такой механизм конвективной неустойчивости как эффект Марангони. В органическом растворителе частично растворим только один из реагентов, как правило, кислота. В результате органический растворитель является пассивным резервуаром для этого реагента и обеспечивает его поток через межфазную поверхность, а сама реакция протекает в водной фазе и там же накапливается продукт реакции.

При нормальной силе тяжести в описанной постановке наблюдались следующие конвективные режимы: при небольшой концентрации основания в нижнем, водном, слое раствор кислоты, диффундирующей из верхнего слоя пентанола, оказывается более плотным, что приводит к развитию неустойчивости Рэлея-Тейлора в виде тонущих плюмов. В ходе реакции плотность плюмов уменьшается, в результате чего они останавливаются на некоторой глубине, формируя горизонтальный ряд конвективных ячеек. Таким образом, наличие реакции приводит к пространственной локализации неустойчивости Рэлея-Тейлора, что никогда не наблюдается для такого типа неустойчивости в безреакционных системах. При повышении содержания основания в нижнем слое разность плотностей уменьшается, что ведет к уменьшению интенсивности плюмов и их более ранней остановке. Наконец, при некоторой пороговой концентрации основания в нижнем слое устанавливается устойчивая стратификация плотности, что делает невозможным развитие неустойчивости. Дальнейшая реакция при этом протекает под контролем исключительно диффузионных процессов.

В данной работе экспериментально исследуется влияние центробежных перегрузок на описанные выше конвективные режимы. Поскольку, как уже указывалось выше, выбор реагентов предполагает возможность развития только гравитационно-зависимых типов неустойчивости, то ожидалось, что наличие центробежной силы должно приводить к интенсификации конвективного течения по отношению к поведению системы в поле тяжести. Однако, как показали наблюдения, интересным результатом является кардинальная смена структуры течения при незначительном увеличении скорости протекания реакции за счет конвективного движения. Причем причиной смены структуры течения оказывается сила Кориолиса, проявлениями которой традиционно пренебрегается в теоретических исследованиях в силу, как считается, ее малости по сравнению с центробежной силой.

ДИЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ВОДО-МАСЛЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЕГИДРАТАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Шмыров А.В., Мошева Е.А., Мизёв А.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

alex_mizev@icmm.ru

Актуальной задачей, возникающей при добыче и переработке нефти, является удаление примесной воды, содержащейся в добываемой нефти в виде эмульсии. Существующие на сегодняшний день методы разделения водонефтяных эмульсий основаны на использовании различий физико-химических параметров (плотности, проводимости, диэлектрической проницаемости, смачиваемости и др.) дисперсной фазы и дисперсионной среды. Наиболее эффективными, с точки зрения скорости разделения и наименьшего влияния на нефть, считаются методы, основанные на использовании электрического поля, основная идея которых состоит в создании условий для электрокоалесценции с последующим осаждением укрупненных капель в гравитационном или центробежном поле. При этом процесс часто сопровождается рядом нежелательных явлений, таких как выстраивание капельных цепочек, обратная эмульгация или возникновение ЭГД течений, что существенно ограничивает напряженность поля и диапазон концентраций обрабатываемых эмульсий. В настоящем докладе рассматривается альтернативный подход, основанный на использовании электрического поля, в первую очередь, для пространственного перераспределения капель за счет диэлектрофоретических эффектов. В то же время, применение высокочастотных полей позволяет избежать указанных выше нежелательных эффектов, сохраняя при этом явление электрокоалесценции.

Эксперименты проводились в стеклянной кювете $15 \times 15 \times 8$ мм. Неоднородное электрическое поле создавалось системой электродов стержень-пластина, формирующей сектор цилиндрического конденсатора. Electroды присоединены к высокочастотному 15 кГц высоковольтному источнику питания с амплитудой до 5 кВ. В качестве дисперсионной среды использована смесь бензола и хлорбензола равной с водой плотности, что позволило избежать гравитационных эффектов осаждения и сосредоточиться на изучении только электрофизических явлений. В качестве дисперсной фазы использована вода высокой степени очистки. Объемная концентрация эмульсии варьировалась от 0.01 до 1%. В ходе проведения экспериментов в зависимости от разности потенциалов и характеристик эмульсии изучалась как динамика отдельных капель, так и изменение концентрации эмульсии со временем, что позволяло оценивать эффективность дегидратации.

Эксперименты показали, что после создания разности потенциалов капли воды начинают двигаться в область сильного поля к центральному электроду, где собираются в виде сплошного слоя. Обнаружено, что скорость пространственного разделения увеличивается с ростом разности потенциалов, а также с увеличением среднего размера и концентрации капель в начальной эмульсии. В последнем случае рост эффективности обусловлен электрокоалесценцией соседних движущихся капель за счет вторичного диэлектрофоретического эффекта. Обнаружено, что при оптимальных параметрах для извлечения 90% капель требуется в разы меньше времени, чем при гравитационном осаждении при разности плотностей $0,1 \text{ г/см}^3$. На основе анализа полученных данных предложены безразмерные комплексы, позволяющие объединить результаты различных экспериментов в виде единых зависимостей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта (грант № 20-41-596009).

ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛИНЗОВАННЫХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Шмырова А.И., Нурмухаметов Д.И., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С., Паньков А.С.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
shmyrova@psu.ru, danur95@yandex.ru, akornilicyn@gmail.com, rspanomarev@gmail.com,
lab.photon.psu@gmail.com*

Волоконные световоды (ВС) с микролинзами на торце, называемые также линзованными волокнами, широко применяются в интегральной и волоконной оптике для повышения эффективности ввода/вывода излучения. На сегодняшний день разработаны различные методы, изготовления микролинз непосредственно на торце волновода, такие как: вытягивание волокон, плавление, механическое полирование, химическое травление и лазерная микрообработка. В настоящей работе описана технология создания оптических микролинз на торце ВС методом травления под действием гидродинамического течения, генерируемого инфракрасным излучением.

Процесс химического травления происходил на межфазной границе 40% водного раствора плавиковой кислоты, органического растворителя Ксилола, олеиновой кислоты или вакуумного масла VM-1С на торце прямоосколотого волокна, зачищенного от акрилатного покрытия (ЗУП) и буфера на 1 см; зачищенного только от буфера и сколотого до уровня ЗУП; аналогично первым двум случаям, но под влиянием гидродинамического течения, которое генерируется инфракрасным излучением, проходящим через искомый ВС. Результатом химической реакции является продукт травления тяжелее плавиковой кислоты, что приводит к формированию опускного течения. Течение визуализировалось путем добавления в жидкую фазу полиамидных частиц нейтральной плавучести размером 20 мкм или углеродных частиц размером порядка 5 мкм. Для формирования вокруг ВС гидродинамического течения, последний подключался к лазерному источнику излучения $\lambda=980$ нм, мощность которого варьировалась с помощью драйвера от 65 до 195 мВт, что позволяло управлять скоростью движения жидкости в кислотной среде. Использование электромагнитного излучения, пропускаемого через ВС, позволяло подавить опускное течение, формирующимся подъемным потоком. В зависимости от мощности излучения в работе реализовывались такие течения как: встречные течения со «слепой» зоной, конвективные валы или мощные подъемные потоки, растекающиеся под межфазной поверхностью.

Для оценки качества получаемых линзованных волокон в работе были проведены наблюдения за формой светового пятна, измерен диаметр поля моды и определено фокусное расстояние линзованных волокон с помощью оптического интерферометра Фабри–Перо.

Показано, что наличие в системе гидродинамического течения, генерируемого инфракрасным излучением через искомый ВС, приводит к изменению формы линзы, а также ускоряет процесс травления волокна. Травление волокна в ЗУПе не зависимо от наличия омывающего течения обеспечивает получение линзы более правильной формы с гладкой поверхностью по сравнению с травлением ВС, зачищенного от буфера и ЗУП.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121101300016-2).

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПАРЫ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН

Шобей М. М.¹, Судаков И. А.¹, Зайцев А. В.¹, Панин С. В.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

maksim-shobey@yandex.ru, sudakov-ia@yandex.ru, a-zaitsev@mail.ru, svp@ispms.ru

В процессе эксплуатации направляющих скольжения выявлен повышенный износ стального рельса при взаимодействии с накладкой из политетрафторэтилена, наполненной мелкодисперсной бронзой. На контактную поверхность накладки нанесены смазочные канавки, предназначенные для равномерного распределения и удержания смазывающего материала в зоне контакта. Для установления причин повышенного износа сопряженной стальной поверхности выявлены факторы, влияющие на износостойкость направляющих.

Проведены испытания на одноосное растяжение образцов материала накладки с целью определения физико-механических характеристик для установления их соответствия с предельными значениями. Предложены малогабаритные образцы накладки и стального рельса для проведения сравнительных испытаний на износостойкость с целью оценки влияния геометрии смазочных канавок на триботехнические характеристики пары трения. Приведена краевая задача контактного взаимодействия в квазистатической постановке с учетом сил трения и определены граничные условия. Проведено численное моделирование пары трения накладка – стальной рельс. Результаты численного моделирования показывают, что наличие острых граней на кромках смазочных канавок и торцах накладки приводит к появлению повышенного контактного давления и концентраторов контактных напряжений, что способствует разрушению образующейся масляной пленки и препятствует равномерному смазыванию.

Разработана программа и методика испытаний малогабаритных образцов направляющих на износостойкость при возвратно-поступательном движении с учетом диапазона эксплуатационных значений величин контактного давления, скоростей скольжения и подачи смазочного материала.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM–2020–0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг. и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 19–41–590026)

НЕЛОКАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕЖИМЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Шутов А.В.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, Новосибирск
alexey.v.shutov@gmail.com*

Представлен ряд геометрически нелинейных моделей упругопластического деформирования, предназначенных для сквозного моделирования процессов накопления повреждений и разрушения. Модели и алгоритмы внедрены в нелинейный комплекс метода конечных элементов и в пакет метода механики сглаженных частиц. Для обеспечения сходимости численного решения при измельчении пространственной дискретизации, применяются «сильно» нелокальные определяющие соотношения. Делокализация моделей материала проводится с помощью интегральных операторов усреднения со специально подобранными ядрами. Предложено новое «простое в использовании» ядро делокализации. Исследуются базовые свойства нелокальных моделей, демонстрируется превосходство нелокальных моделей над классическими локальными определяющими соотношениями, обсуждаются методики калибровки моделей по реальным экспериментальным данным, приводятся примеры решения демонстрационных задач, включая задачу о разрушении сварной конструкции.

Литература

- [1] Shutov A.V., Klyuchantsev V.S. Large strain integral-based nonlocal simulation of ductile damage with application to mode-I fracture // International Journal of Plasticity. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103061>
- [2] Shutov A.V., Klyuchantsev V.S. Integral-based averaging with spatial symmetries for non-local damage modelling // ZAMM. – 2022. <https://doi.org/10.1002/zamm.202100434>

ЭФФЕКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

Шутов А.В.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Рассмотрены два метода построения определяющих соотношений, применяемых для описания физически нелинейного поведения волокнистых композитов в режиме конечных деформаций. Первый метод основан на работе с мультипликативными разложениями тензора градиента деформации в сочетании с гиперупругой связью между напряжениями и упругой деформацией. Второй метод основан на концепции представительных направлений, которая позволяет обобщать одноосные законы материала на случай произвольного трёхосного нагружения. Обсуждаются фундаментальные свойства полученных моделей, такие как объективность, термодинамическая совместность, w -инвариантность. Для обоих методов строятся эффективные вычислительные схемы, пригодные для внедрения в коммерческие и исследовательские конечно-элементные комплексы. Обсуждается методика учёта начальных (остаточных) напряжений, а также моделирование изначально анизотропных материалов. Приводятся примеры из области биомеханики, такие как моделирование анастомоза кровеносных сосудов и моделирование искусственной ткани протеза сосуда.

Литература

- [1] Shutov A., Rodionov A., Ponomarev D., Nekrasova Y.: Computationally efficient concept of representative directions for anisotropic fibrous materials // *Polymers*. – 2022. – V. 14(16). – P. 3314
- [2] Tagiltsev I.I., Parshin D.V., Shutov A.V.: Rational choice of modelling assumptions for simulation of blood vessel end-to-side anastomosis // *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. – 2022. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2022022>
- [3] Tagiltsev I.I., Shutov A.V. Geometrically nonlinear modelling of pre-stressed viscoelastic fibre-reinforced composites with application to arteries // *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. – 2021. – V. 20. – P.323–337.

ГИПЕР-ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

Яковлева Т.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов
yan-tan1987@mail.ru

В работе построена математическая модель функционально-градиентной пористой замкнутой цилиндрической нанооболочки при действии локальной знакопеременной нагрузки. В качестве кинематической модели для оболочки выбрана гипотеза Кирхгофа-Лява. Геометрическая нелинейность учитывается по модели Т. фон Кармана. Наноэффекты учитываются по модифицированной моментной теории упругости [1]. При построении функционально-градиентной теории рассматривались материалы: керамика и металл. Для металла зависимость напряжения от деформации является нелинейной. Материал керамики - упругий. Пористость принята по теории, описанной в работе [2]. Вариационные и дифференциальные уравнения, граничные и начальные условия получены из принципа Гамильтона. Сформулированы теоремы существования решения. Численные результаты получены методом Бубнова-Галеркина в высших приближениях. Исследуется сходимость метода, которая требует совпадения не только основных функций для N членов ряда по сравнению с $(N-1)$ членами ряда, но и их вторых производных. Построен алгоритм, который позволяет исследовать тип сложных колебаний (хаос, гипер-хаос) нанооболочки при действии знакопеременной полосовой нагрузки. Анализ типа хаоса основан на количестве положительных показателей Ляпунова в спектре, которые вычислялись методами Сано-Савада и Добрияна-Крысько [3]. Исследуется влияние на характер колебаний функционально-градиентной замкнутой цилиндрической нанооболочки размерно-зависимых параметров и пористости.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-71-10083, <https://rscf.ru/project/22-71-10083/#!>

Литература

- [1] Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. // International Journal of Solids and Structures. 2002, 39(10), pp. 2731 - 2743.
- [2] Fan F., Xu Y., Sahmani S., Safaei B. Modified couple stress based geometrically nonlinear oscillations of porous functionally microplates using NURBS-based isogeometric approach. // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2020. . – pp. 372, 113400.
- [3] Yakovleva, T.V., Awrejcewicz, J., Kruzhilin, V.S., Krysko, V.A. On the chaotic and hyper-chaotic dynamics of nanobeams with low shear stiffness. Chaos, 2021, 31(2), 023107

ДИАГНОСТИКА БОЛЬНЫХ АЛКОГОЛИЗМОМ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

Яковлева Т.В.¹, Крысько А.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск
yan-tan1987@mail.ru, anton.krysko@gmail.com

В работе создана методология исследования сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) пациентов на основе методов нелинейной динамики [1] и машинного обучения с целью выявления больных с алкогольной зависимостью. Важной проблемой является выделение характерных особенностей работы головного мозга, которые сопутствуют заболеванию. Записи ЭЭГ производились в НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН по 16 каналам схемы расположения «10-20». Предлагается исследовать фрагменты ЭЭГ контрольной группы и больных с алкогольной зависимостью методами Фурье и вейвлет-анализа. Поиск характерных паттернов на фрагментах ЭЭГ проводится на базе вычисления нескольких типов энтропии. Предлагаемая методология включает в себя исследование степени хаотизации сигналов с помощью вычисления спектра показателей Ляпунова [2] методом Сано-Савада и вычисления старшего показателя Ляпунова методами Канца, Вольфа, Розенштейна. Применение сразу нескольких методов для вычисления каждой характеристики (энтропии или показателя Ляпунова) позволяет обеспечить достоверность результатов. Полученные характеристики передаются на вход сверточной нейронной сети (CNN) для классификации больных с алкогольной зависимостью и контрольной группы. Созданная методология и полученные на ее основе результаты хорошо согласуются с медицинским заключением.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-11-00160.

Литература

- [1] Tatiana V. Yakovleva, Ilya E. Kutepov, Antonina Yu Karas, Nikolai M. Yakovlev, Vitalii V. Dobriyan, Irina V. Papkova, Maxim V. Zhigalov, Olga A. Saltykova, Anton V. Krysko, Tatiana Yu Yaroshenko, Nikolai P. Erofeev, Vadim A. Krysko, "EEG Analysis in Structural Focal Epilepsy Using the Methods of Nonlinear Dynamics (Lyapunov Exponents, Lempel–Ziv Complexity, and Multiscale Entropy)", *The Scientific World Journal*, vol. 2020, Article ID 8407872, 13 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8407872>
- [2] Yakovleva, T.V., Dobriyan, V.V., Yaroshenko, T.Y., Krysko-jr, V.A. Mathematical Modeling and Diagnostics Using Neural Networks and a Genetic Algorithm for Epilepsy Patients. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 2022, 141, pp. 563–573

Авторский указатель

А

Аввакумов Д.А., 303
Агеева М.В., 19
Аглетдинов Э.А., 20
Адамов А.А., 161, 270
Айзикович С.М., 21
Актершев С.П., 22
Алабужев А.А., 23, 68
Алексеенко С.В., 22
Аль-Раммахи А.А., 153
Амбаров А.В., 24
Андреев Н.В., 167
Андреева А.И., 25
Андрейко С.С., 26
Андрюкова В.Ю., 27
Аникин В.В., 26
Анисимов Г.С., 322
Анисимов Р.А., 28
Антипова А.А., 129
Антонова О.В., 89, 133, 254
Артамонова Н.Б., 29, 374
Архипов В.А., 30, 31, 32
Асташина Н.Б., 140
Ашуров Д.А., 72, 134

Б

Бакланов В.Д., 236
Балахнин А.Н., 33
Балдин М.Н., 34, 172
Банников М.В., 20, 35, 39
Банникова И.А., 33, 36, 40
Банщиков С.И., 37
Барях А.А., 38, 93, 315
Басалаев С.А., 30
Башкиров А.С., 273, 274
Башмаков Р.А., 234
Баяндин Ю.В., 20, 35, 36, 39,
40, 54, 195, 240
Бедин С.А., 347
Безверхий Д.С., 34, 172
Бекмансуров М.Р., 147
Белавенцева А.В., 279
Белавина Е.А., 41
Белова О.Н., 42
Белоножко Д.Ф., 43
Белошапка В.Я., 44
Беляев А.К., 45
Беляев А.Ю., 218
Беляев И.Ю., 136

Бервицкий А.В., 333
Бердников В.С., 46
Бердюгин Д.А., 41
Беседина А.Н., 219
Биллер А.М., 47
Благин Е., 129
Богачев И.В., 48
Богданов С., 31
Богомоллов А.В., 207
Бондаренко А.А., 49
Борзенко Е.И., 31
Бочкарёв С.А., 50
Брацун Д.А., 51, 178, 340
Брюханов И.А., 52
Бублик С.А., 53, 249
Буркова Е.Н., 283
Бурмистров Е.В., 20
Бурмистрова О.С., 54
Быков А.В., 150

В

Варелджан М.В., 115
Васильев А.Ю., 55, 56, 284,
320, 328, 346, 349
Вассерман И.Н., 57
Веденеев В.В., 58, 72, 134
Вергелес С.С., 59, 138
Верещагин В.В., 141
Вертгейм И.И., 278
Вершинин А.В., 194
Ветров А.Л., 110, 150
Вильдеман В.Э., 60, 61, 92,
224, 225
Виндокуров И.В., 62, 111
Витохин Е.Ю., 63
Власова О.А., 64, 65, 66
Возняковский А.П., 73
Волков Г.А., 67
Волков С.С., 21
Володин И.В., 68
Волчков И.С., 258
Вшивков А.Н., 33, 75, 143
Вшивкова А.А., 69
Вяткин Я.В., 70

Г

Гаврилов А.А., 71, 200, 346
Гаврилов Н.В., 160
Галкина Е.Б., 343
Гареев Л.Р., 72, 134

Гаришин О.К., 73, 74, 314
Гаркушин А.А., 129
Гачегова Е.А., 75, 143
Герасимов О.В., 76
Герасимов Р.М., 77, 78
Герцен Т.А., 79, 206
Гладких П.А., 80
Глебов М.А., 80
Глот И.О., 94, 369
Глушков Е.В., 115
Глушкова Н.В., 115
Говорухин В.Н., 205
Голбрайх Е., 243
Голдобин А.А., 81, 82, 87, 88
Голдобин Д.С., 83, 84, 85,
266, 335
Головатый И.И., 305
Головин М.С., 39
Гольбрайх Е.И., 245
Гольцов Е.С., 86
Гончаров М.М., 81, 82, 87,
88, 283
Гордеев А.Н., 89
Горячева И.Г., 90
Гракович П.Н., 161
Грибов Д.С., 78, 91
Гриневиц А.А., 329
Груздь С.А., 302
Гурджиев А.В., 92
Гусев Г.Н., 93, 94, 95, 355
Гусева И.Е., 329

Д

Девятков С.Ю., 38
Дектерев Д.А., 96
Демин В.А., 19, 97, 241
Демина Т.В., 19
Денисова И.В., 98
Денисова М.О., 99, 379
Денисюк Е.Я., 100
Дмитриев С.В., 101
Добрян В.В., 102
Добросердова А.Б., 103, 123
Добрыднева А.Д., 201
Долгих Д.А., 104
Долматова А.В., 83
Дрёмин В.В., 105
Дудин Д.С., 106
Дунченкин П.В., 107
Дьякова В.В., 65, 108

Е

Евграфова А.В., 109, 110
Евлашин С.А., 342
Евстигнеева А.А., 361
Еленская Н.В., 111
Елфимова Е.А., 24, 112, 122,
287, 293
Ельтищев В.А., 49, 113
Епин В.В., 94, 95, 355, 369
Еремеев В.А., 114
Еремин А.А., 115
Ермакова А.С., 116
Ерманюк Е.В., 160, 325, 326,
378
Ерошенко А.Ю., 33
Ерпулев А.А., 41
Ефремов Д.В., 40, 336

Ж

Жигалов М.В., 211

З

Зайцев А.В., 117, 260, 382
Зайцев В.Ю., 118
Зайцев Д.В., 119, 261
Засимова М.А., 120, 121, 323
Зверев В.С., 24, 112, 122,
123, 293
Звягинцева Е.А., 164
Зданчук Е.В., 124
Зеленцов В.Б., 21
Земсков А.В., 125
Зильбершмидт В.В., 62, 104,
330
Зимасова А.Р., 126
Зинурова В.Э., 19
Золоторев Н.Н., 30, 32
Зубарев А.Ю., 127, 229, 362
Зуев А.Л., 128, 129

И

Иванкова Е.П., 361
Иванов А.О., 122, 123, 130,
186
Иванов А.С., 131, 132
Иванов М.В., 133
Иванов Н.Г., 121, 323
Иванов О.О., 72, 134
Иванов П.С., 135
Иванов Я.Н., 136, 332, 364
Иванцов А.О., 137

Ивченко Н.А., 138
Игнатов А.А., 139
Игнатова А.М., 35, 140, 141,
289
Изюмов Р.И., 142
Изюмова А.Ю., 75, 143
Илларионов Е.А., 144
Ильгамов М.А., 101
Ильбиных А.В., 145
Ильбиных Г.В., 146, 147
Исаев С.А., 148
Исаевич А.Г., 137
Исахов А., 207
Искакова Л.Ю., 127

К

Кабанова П.К., 149
Кадиров А.М., 327
Калинин Н.А., 150
Калуцкий Л.А., 151
Калюжная Д.А., 297
Каменских А.А., 152, 153,
154, 155, 156
Камшилин А.А., 157, 279
Канторович С.С., 103, 185
Каракулова Ю.В., 272
Карасев Т.О., 158
Карасева У.П., 159
Карев В.И., 260, 339
Карра Ж.-Б., 160, 378
Келлер И.Э., 106, 161, 270,
271, 301, 353
Кислицын В.Д., 162
Клименко Л.С., 84, 85, 215
Клиорин Н.И., 320
Князев Д.В., 163
Князев Н.А., 176
Коваленко Ю.Ф., 260, 339
Ковалец Н.П., 258
Козлов В.Г., 65, 126, 164,
300, 325, 326
Козлов И.В., 274
Козлов Н.В., 165, 166, 190
Козубняк С.А., 233
Колесникова В.Г., 167
Колесниченко И.В., 37, 49,
168, 169, 170, 212, 213,
214, 243, 244, 245, 246,
280, 281
Колчанов Н.В., 171
Колчанова Е.А., 171

Кондратьев Н.С., 34, 172,
209
Кондюрин А.В., 267
Конев И.П., 317
Корелин А.А., 173
Корепанов В.В., 95, 355
Корнилицын А.Р., 381
Коровайцева Е.А., 174
Коровин Р.В., 261
Косков М.А., 131
Костарев К.В., 51
Костарев К.Г., 99, 175
Котельникова Н.В., 176
Кочанов А.Н., 261
Кочнева Я.В., 60
Кочубей В.И., 28
Кошелева Н.А., 307
Кошкина А.А., 240
Красикова А.Д., 120
Красников Г.В., 177
Красняков И.В., 178
Кречин А.Н., 179
Кривилев М.Д., 180
Криштоп В.В., 129
Кружилин В.С., 181
Крыласова О.С., 182
Крылова Е.Ю., 183, 184
Крысина А.С., 152
Крысько А.В., 151, 262, 386
Крысько В.А., 151, 211, 331
Кудымова Е.М., 164
Кузанын К.М., 320
Кузнецов А.А., 185
Кузнецов М.А., 112
Кузнецова О.Б., 186
Кузнецова Ю.Л., 187
Кузьмин В.А., 133
Кузьминых В.С., 161
Куклина А.А., 119
Курганский М.В., 188
Курмоярцева К.А., 189
Кучинский М.О., 190, 294
Кучуков А.М., 61
Кучумов А.Г., 272, 275
Куянова Ю.О., 333
Кэмп Ф.Дж., 130

Л

Лалин В.В., 124, 191
Ламоткин А.Е., 217
Ландик Л.В., 267
Лапина П.А., 21

Лапшина К.Ю., 256
Ласковец Е.В., 192
Ле Ван Хао, 125
Лебедев А.В., 193
Левин В.А., 194
Левин Л.Ю., 305
Ледон Д.Р., 195
Лекомцев С.В., 50, 196
Лепихин А.П., 207
Лесникова Ю.И., 197
Лисовенко Д.С., 198
Литвинов В.В., 364
Литвинов В.Л., 199
Литвинова К.В., 199
Литвинцев К.Ю., 200, 346
Лобанов Д.С., 227, 359
Лобов Е.С., 201
Логинова Н.П., 140
Ломакин Е.В., 342, 345
Ломова М.В., 28
Лосев Г.Л., 37, 113, 202, 203,
214, 243
Лукин С.В., 20
Лунегова Е.М., 61, 359
Лучинкин Н.А., 204
Лысенко Ф.П., 205
Любимова Н.Ю., 79, 206
Любимова Т.П., 137, 207,
208, 294, 299, 341
Ляхин Ю.С., 207

М

Макаревич Е.С., 209
Макаренко Н.И., 210
Макарихин И.Ю., 81, 82, 87,
88
Максеев А.Е., 211
Мальцев В.М., 26
Мамонтов О.В., 279
Мамыкин А.Д., 37, 113, 169,
170, 202, 203, 212, 213,
214, 245
Марышев Б.С., 215, 350
Маслов В.А., 308
Матвеев В.П., 196
Машкина А.К., 365
Меженев М.Е., 119, 261
Мельникова В.А., 227, 318
Мержоева Л.Р., 216
Мерзляков А.Ф., 267, 282
Мешкова В.Д., 96
Мещерякова А.Р., 90

Мизёв А.И., 165, 223, 379,
380
Мизева И.А., 177, 279, 352
Минаев Н.Г., 345
Митюшов Е.А., 217
Митяков В.Ю., 308
Михайлов А.А., 89, 133
Михайлов В.О., 38
Мишланов В.Ю., 128, 129
Морозов И.А., 136, 218
Морозова К.Г., 219
Мохирева К.А., 220
Мошева Е.А., 166, 221, 222,
223, 380
Мубассарова В.А., 260
Мугатаров А.И., 61, 224,
225, 318
Мугинов Р.Р., 226
Муллахметов М.Н., 227
Мурашкин Е.В., 228
Мусихин А.Ю., 229
Мушанкова К.А., 230, 231

Н

Назарова Е.Д., 264
Наймарк О.Б., 20, 33, 35, 36,
54, 140, 141, 232, 240, 242,
289, 313, 363
Намоконов А.Н., 361
Нарайкин О.С., 233
Насырова Д.А., 234
Нго Х.Х., 191
Неверовская А.Ю., 73
Недин Р.Д., 48
Некрасов О.О., 235
Нестеров С.А., 236
Никитин А.Д., 237, 238
Никитин И.С., 237, 238
Никитин Н.В., 58, 239
Никитина К.А., 129
Никитюк А.С., 20, 35, 54,
240
Николаев А.В., 153
Никулин И.Л., 241
Никулина С.А., 241
Нихамкин М.Ш., 317
Новак Е.В., 123, 185
Носов Ю.О., 153, 154, 155
Нурмухаметов Д.И., 381
Нуруллаев Э.М., 206

О

Оборин В.А., 242, 313
Озерных В.С., 243, 244
Окательев Р.С., 245, 246, 247
Оконечников А.С., 248
Ольховский Д.В., 249
Омельянчик А.С., 167, 250
Осипенко М.А., 251
Осколков А.А., 301
Осоргина И.В., 142, 282
Останин П.А., 252
Остапович К.В., 253
Остапчук А.А., 219
Острер С.Г., 161
Охотников А.О., 254
Охотников О.И., 254
Очиров А.А., 255, 256

П

Павлов И.С., 101
Палымский И.Б., 257
Панин С.В., 382
Панов Д.В., 258
Пантелеев И.А., 259, 260,
315
Панфилов П.Е., 119, 261
Паньков А.М., 145
Паньков А.С., 381
Панькова А.П., 156
Панькова Н.В., 166
Папкова И.В., 262, 263
Папугаева А.В., 347
Парфеньев В.М., 59
Паршакова Я.Н., 207
Паршин Д.В., 216, 333
Патраков И.М., 161
Пегливанова М.М., 264
Пелевин А.Г., 142, 265
Перминов А.В., 158, 226
Пермяков Г.Л., 145
Пермякова Э.В., 266
Перфильева К.Г., 30, 32
Пестренин В.М., 267
Пестренина И.В., 267
Петров А.Г., 268
Петров Д.А., 269
Петров Ю.В., 67
Петухов Д.С., 161, 270, 271
Петухов М.И., 97
Пешин С.Е., 272

- Пещеренко С.Н., 116, 226,
273, 274
Пиль Н.Е., 275
Пинягин Д.С., 276
Пирогова Ю.В., 111, 277
Плехов О.А., 75, 143
Плотников С.А., 278
Подолян Н.В., 279
Подседерцев А.Н., 172, 209
Полежаев Д.А., 66, 108
Полуянов А.О., 280, 281
Полякова О.Р., 45
Полянская О.Н., 204
Поморцева Т.Н., 265, 267,
282
Пономарёв Р.С., 97, 381
Поперечный И.С., 182
Попов Е.С., 81, 82, 283
Попова Е.Н., 55, 284, 328,
346, 349
Прууэл Э.Р., 285
Пшеничников А.Ф., 132
Пшеничнов С.Г., 286
Пьянзина Е.С., 103, 123, 185
Пятницкая Н.Ю., 41
- Р**
- Радаев Ю.Н., 228
Радушнов Д.И., 287
Разуванов Н.Г., 204
Разумовская И.В., 347
Райхер Ю.Л., 47, 292, 324
Рапекта С.И., 140
Рахматулин Р.Р., 76
Ременникова М.В., 129
Рис В.В., 121
Ровой Э., 254
Роговой А.А., 288
Роготнев А.А., 140, 289
Родионова В.В., 139, 167,
250
Романец В.Я., 164
Романов К.А., 290, 371
Рублев И.А., 291
Русаков В.В., 292
Русанов М.С., 112, 293
Рыбкин К.А., 294, 299
Рыжков А.В., 295
Рысин К.Ю., 296
Ряполов П.А., 297, 372
- С**
- Савиковский А.В., 89
Савин А.В., 101
Садилов Е.С., 298
Садовникова А.Д., 299
Саженок Н.А., 317
Сайдаков В.Д., 300
Салихова Н.К., 301
Самойлова А.Е., 85
Самсонов Д.С., 302
Сапожников С.З., 308
Саркисян С.О., 183
Сафарян К.А., 87, 88
Сахабутдинова Л.Р., 303,
310
Саченков О.А., 76
Свистков А.Л., 73, 142, 162,
220, 265, 304, 314
Семенов А.С., 89
Семин М.А., 53, 137, 305
Сенин А.Н., 196
Серенкова А.Ю., 306
Сероваев Г.С., 307
Сероштанов В.В., 308
Симонов М.Ю., 313
Синичкина А.О., 184
Скульский О.И., 309
Сметанников О.Ю., 146,
147, 310
Смольянов И.А., 311, 377
Смородин Б.Л., 235, 312
Соколов М.А., 242, 313,
363
Соколов А.К., 314
Соколов А.С., 315
Соколов Д.Д., 144, 247, 306,
316, 321
Соколов Е.А., 297
Солдатов И.В., 167
Соловьева А.Ю., 186, 287
Солодников С.Ю., 364
Соломонов Д.Г., 317
Солонников В.А., 98
Сомов С.А., 131
Сорокин Ф.Д., 233
Станкевич Ю.А., 333
Староверов О.А., 61, 225,
318, 342
Стенникова О.Е., 378
Степанов Р.А., 56, 319, 320,
321, 373
- Степанова Л.В., 42, 230, 231,
322, 356
Степашева Е.Д., 323
Столбов О.В., 47, 139, 324
Столбова О.С., 288
Струкова В.И., 155
Струнгарь Е.М., 61, 145, 360
Ступникова А.В., 51
Субботин С.В., 325, 326, 375
Судаков А.И., 367
Судаков И.А., 382
Султанов Л.У., 327
Суханов А.Е., 137
Сухановский А.Н., 55, 284,
320, 328, 349
- Т**
- Танканаг А.В., 329
Тарасов В.Н., 27
Тарасова А.С., 330
Тараут А.В., 312
Ташкинов М.А., 62, 104,
111, 201, 277, 330, 368
Тебякин А.Д., 331
Тимкина Т.Д., 332
Тимошкина Е.П., 38
Тихвинский Д.В., 216, 333
Тихомиров А.Е., 121
Тихонова И.В., 329
Товстик Т.П., 45
Толстых М.А., 334
Топорков А.И., 303
Торохова С.В., 175
Третьяков М.П., 92
Трусов П.В., 69, 91, 209, 290,
370, 371
Труфанова Н.М., 86, 173
Трушников Д.Н., 301
Тумачёв Д.Д., 59
Тюлькина И.В., 335
- У**
- Уваров С.В., 20, 33, 35, 36,
39, 313, 336, 363
Угрюмов Р.И., 337
Усанина А.С., 30, 31
Устинов К.Б., 260, 338, 339
Уточкин В.Ю., 340
- Ф**
- Фатталов О.О., 341

Фаттахова И.А., 299
Федоренко А.Н., 342, 345
Фёдоров А.Ю., 343
Федотенков Г.В., 248, 344
Федотов К.А., 351
Федулов Б.Н., 342, 345
Феклистова Е.В., 145
Феокистова Е.С., 248
Филатов С.В., 59
Филимонов С.А., 200, 346
Филин В.Ю., 264
Филиппова Ю.А., 347
Фрейдин А.Б., 149, 159, 291,
348
Фрик П.Г., 55, 245, 246, 247,
321, 349, 373
Фукалов А.А., 117

Х

Хабин М.Р., 350
Халилов Р.И., 37, 168, 169,
170, 214
Хвостунков К.А., 351
Химуля В.В., 260
Хохрякова К.А., 352
Хроматов В.Е., 353

Ц

Цаюков А.А., 354
Цветков Р.В., 94, 95, 355,
369

Цыпкина И.М., 73

Ч

Чаплий Д.В., 356
Чашечкин Ю.Д., 357, 358
Чеботарева Е.А., 61, 227,
318, 359, 360
Черданцев А.В., 160
Чернышова Д.В., 361
Чечулина Е.А., 78
Чириков Д.Н., 362
Чудинов В.В., 20, 313, 363
Чудинов В.С., 136, 142, 332,
364
Чупахин А.П., 216
Чупеев И.А., 269
Чупин А.В., 365

Ш

Шавшуков В.Е., 366
Шадрин В.В., 73, 74, 162,
282
Шакиров Н.В., 367
Шалимов А.С., 368
Шардаков И.Н., 93, 94, 95,
136, 332, 355, 364, 369
Шарифулин А.Н., 278
Шарифуллина Э.Р., 370
Шаркеев Ю.П., 33
Шаффер Р., 167

Швейкин А.И., 69, 290, 370,
371

Шевцов Н.И., 260
Шельдешова Е.В., 372
Шестаков А.В., 373
Шестаков А.П., 94, 95, 355,
369
Шешенин С.В., 29, 374
Шилько И.С., 161
Ширяева М.А., 325, 375
Шитикова М.В., 376
Шмаков Е.И., 311, 377
Шмакова Н.Д., 160, 325, 326,
378
Шмыров А.В., 223, 352, 379,
380
Шмырова А.И., 381
Шобей М.М., 382
Шубенков И.С., 208
Шутов А.В., 383, 384

Ю

Юрина А.Д., 283
Юшков Е.В., 306

Я

Яковлева Т.В., 107, 179, 181,
263, 385, 386
Янина И.Ю., 28
Янкин А.С., 227

Научное издание

**XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред,
Пермь, 13 – 17 февраля 2023 г.
Тезисы докладов**

Утверждено к печати ученым советом
«Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» -
филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

Издается в авторской редакции
Оригинал-макет - Юрлова Н.А., Баяндин Ю.В., Савельева Н.В.

Подписано в печать 25.01.2023. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,79. Уч. изд. л. 36,97
Тираж – 350 экз. Заказ № 10/2023

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1
«ИМСС УрО РАН»

Отпечатано в типографии «Новопринт»
Адрес: 614000, г. Пермь, ул. Клименко, 1, оф. 13
Тел.: (342) 204 5 992

ISBN 978-5-6048400-4-7



9 785604 840047