Институт механики
сплошных сред
Уральского Отделения РАН

РМГД

Российская конференция по Магнитной Гидродинамике

Сборник тезисов

18–22 июня, 2012
Пермь

Министерство
промышленности,
инноваций и науки
Пермского края

Российский
фонд
фундаментальных
исследований

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук

Министерство промышленности, инноваций и науки Пермского края

Российский фонд фундаментальных исследований

Тезисы докладов

Российская конференция по магнитной гидродинамике

18 – 22 июня 2012 г., Пермь, Россия

Пермь, 2012

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

Фрик П.Г. (ИМСС УрО РАН, Пермь) – председатель
Кириллов И.Р. (НИИЭФА, С.Петербург)
Пшеничников А.Ф. (ИМСС УрО РАН, Пермь)
Свиридов В.Г. (МЭИ, Москва)
Соколов Д.Д. (МГУ, Москва)

ТЕМАТИКА

Фундаментальные вопросы магнитной гидродинамики
МГД – турбулентность
Астрофизическая и геофизическая МГД
Магнитные жидкости
Прикладная магнитная гидродинамика

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Министерство промышленности, инноваций и науки Пермского края
Российский фонд фундаментальных исследований

СОДЕРЖАНИЕ

Анисимов А.М., Кириллов И.Р., Обухов Д.М., Преслицкий Г.В. МГД-течение в круглой трубе в неоднородном по длине поперечном магнитном поле 7
Ахметьев П.М. Высшие асимптотические инварианты в МГД 8
Байкин А.Н., Головин С.В. Стационарный цилиндрический вихрь в вязкой электропроводной жидкости 9
Балмасова О.В., Рамазанова А.Г., Королев В.В. Изучение процесса адсорбции нафтеновой кислоты из растворов гептана на поверхности высокодисперсного магнетита 10
Баталов В.Г., Сухановский А.Н. Исследование нестационарного течения в тороидальном канале 11
Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Аль-Джаиш Таха Малик Мансур. Экспериментальное исследование топологической неустойчивости полуограниченной капли магнитной жидкости 12
Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Климович С.В., Моцар А.А. Влияние магнитофореза и броуновской диффузии на плавание тел в магнитной жидкости 13
Безносов А.В., Новожилова О.О., Савинов С.Ю., Ярмонов М.В. Влияние магнитного поля на характеристики теплообмена и мгд-сопротивление потока эвтектики свинец-висмут применительно к системам теплоотвода бланкета токамака 14
Беляев И.А., Листратов Я.И., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г., Свиридов Е.В. Развитие вторичных вихрей в условиях совместного воздействия магнитного поля и термогравитационной конвекции на течение жидкого металла в трубе 15
Божко А.А., Кучукова М.Т., Путин Г.Ф. Влияние внешнего однородного магнитного поля на конвективные течения в шаровой полости магнитной жидкости 16
Божко А.А., Путин Г.Ф. О механизмах конвекции в магнитных жидкостях 17
Божко А.А., Путин Г.Ф., Сидоров А.С., Суслов С.А. Термомагнитные волновые режимы конвекции в вертикальном слое магнитной жидкости 18
Бойчук А.Н., Захлевных А.Н., Макаров Д.В. Ориентационные эффекты в ферронематике во вращающемся магнитном поле 19
Буркова Е.Н., Пшеничников А.Ф. О концентрационной стратификации магнитной жидкости под действием размагничивающих полей 20
Бушуева К.А. Деформация газовых включений в феррожидкости под действием однородного магнитного поля 21
Быстрай Г.П., Лыков И.А., Охотников С.А. Задачи с обострением в магнитной гидродинамике атмосферы. Предельные случаи 22
Виноградова А.С., Налетова В.А., Турков В.А., Рекс А.Г. Гистерезис формы конечного объема магнитной жидкости в осесимметричных магнитных полях 24
Витковский И.В. Проблемы создания МГД-техники для ядерной и термоядерной энергетики 25
Волкова Т.И., Налетова В.А., Турков В.А. Влияние поверхностного натяжения на разрушение магнитожидкостной перемычки между горизонтальными пластинами в поле проводника с током 26
Генин Л.Г., Мельников И.А., Ивочкин Ю.П., Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В. Особенности теплообмена жидкометаллического теплоносителя в термоядерном реакторе-токамаке 27
Глухов А.Ф., Демин В.А., Мальгачева И.А. Экспериментальное исследование конвекции феррожидкостей и молекулярных бинарных смесей в связанных каналах 28
Глухов А.Ф., Демин В.А., Попов Е.А. Теоретическое исследование тепловой конвекции феррожидкости в связанных каналах 29
Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B. On problem of liquid metals mixing in MHD devices 30
Головин С.В. Точные решения уравнений идеальной магнитной гидродинамики 31

Денисов С.А., Долгих В.М., Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Хрипченко С.Ю. МГД-насос бегущего поля для жидкого магния 32
Денисов С.А., Долгих В.М., Колесниченко И.В., Хрипченко С.Ю. Исследование МГД-насоса «Пуш-пул» для жидкого магния 33
Диканский Ю.И., Гладких Д.В., Золотухин А.А. Магнитное упорядочение в магнитных жидкостях 34
Долгих В.М., Денисов С.А., Халилов Р.И., Хрипченко С.Ю. Исследование модели спирального безобмоточного МГД-насоса 35
Елфимова Е.А., Ефимова В.А. Многочастичное взаимодействие и его влияние на ориентацию магнитных моментов пары феррочастиц в магнитной жидкости 36
Елфимова Е.А., Турышева Е.В. Начальная магнитная восприимчивость высококонцентрированных феррожидкостей: теория и компьютерное моделирование 37
Епифанов Ю.А., Елфимова Е.А. Исследование дисперсионного состава магнитных жидкостей 38
Захлевных А.Н., Петров Д.А. Пороговые эффекты в компенсированном ферронематике 39
Захлевных А.Н., Макаров Д.В. Возвратные переходы и трикритические явления в ферронематиках 40
Захлевных А.Н., Райхер Ю.Л., Степанов В.И. Фазовый переход в ферронематике: теория среднего поля 41
Зибольд А.Ф. О двойном ламинарном пограничном слое при МГД-вращении проводящей жидкости в цилиндре 42
Зиканов О., Дей П., Краснов Д., Боек Т. Методы и результаты численного моделирования турбулентности и переноса в магнитогидродинамическом течении в канале 43
Зиканов О.Ю., Листратов Я.И., Свиридов Е.В., Свиридов В.Г., Огнерубов Д.А. Исследование неизотермической МГД-турбулентности методом прямого численного моделирования (DNS) 44
Зубарев Н.М., Кочурин Е.А. Нелинейная динамика поверхности раздела магнитных жидкостей в горизонтальном магнитном поле при наличии тангенциального разрыва скоростей 45
Иванов А.С. Динамика массопереноса в плоском слое магнитной жидкости при наличии ядра магнитной конденсации 46
Иванов С.Л., Флёров А.В Проектирование системы МГД-насосов для жидкометаллической (свинцово-висмутовой) мишени нейтронов расщепления MEGAPIE проекта 47
Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А. Исследование структуры электровихревого течения, выполненное с учетом горизонтальной закрутки и прогиба свободной поверхности 48
Казак О.В. Моделирование электровихревого движения расплава в сталеплавильных печах 49
Капуста А., Михайлович Б., Тильман Б., Хавкин М. Оценка скоростей вращения расплава под действием ВМП в жидкой сердцевине полунепрерывного слитка 50
Кириллов И.Р. Жидкометаллические бланкеты термоядерных реакторов в РФ 51
Кириллов И.Р., Обухов Д.М., Преслицкий Г.В. Пульсации давления в ЭМН с цилиндрическим каналом 52
Клименко Е.М., Симоновский А.Я. Влияние магнитного поля низкой частоты на процесс парообразования при кипении магнитной жидкости 53
Клиорин Н.И. Насколько реальны средние поля в природе? 54
Клюкин А. Экспериментальные исследования жидкометаллических струйных и пленочных течений в приложении к проектированию устройств для токамаков. 55
Колесников Ю.Б., Тесс А. Течения в присутствии магнитных неоднородностей: экспериментальные исследования и приложения 56

Колесников Ю.Б., Тесс А. Течения магнитных неоднородностей: экспериментальные исследования и приложения 57
Колесниченко И.В. Исследование действия электромагнитных сил на двухфазную электропроводную среду в плоском слое 58
Колесниченко И.В., Степанов Р.А., Халилов Р.И. Исследование поля скорости жидкого натрия в тороидальном канале 58
Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Павлинов А.М., Михайлович Б.М. Исследование характеристик МГД-перемешивателя для цилиндрических слитков 59
Королев В.В., Королев Д.В., Рамазанова А.Г., Яшкова В.И. Магнитокалорический эффект и теплоемкость магнитных жидкостей на основе масла «АЛКАРЕН» 60
Котельникова М.С. Численное исследование устойчивости течений типа МГД-вихря Хилла-Шафранова к закрутке 61
Кременецкий В. Исследование устойчивости кольцевого МГД течения между вращающимися цилиндрами с отсосом/вдувом в радиальном и азимутальном магнитных полях в безындукционном приближении 62
Крутикова Е.В., Канторович С.С., Анохин Д.А., Иванов А.О. Анализ поведения структурного фактора полидисперсных магнитных наножидкостей 63
Крутикова Е.В., Минина Е.С., Канторович С.С. Сравнительный анализ методик расчета давления полидисперсных магнитных наножидкостей 64
Кузанян К.М., Соколов Д.Д., Сакураи Т., Гао Ю, Жанг Х. Негауссовские распределения спиральности солнечных магнитных полей в цикле активности 65
Кулагина К.В., Орлов В.А. О спектрах магнитоплазменной турбулентности в хвосте земной магнитосферы 66
Лахтина Е.В. Распределение твердой фазы магнитной жидкости при центрифугировании: эксперимент и моделирование 67
Лебедев А.В. Низкотемпературная магнитная жидкость, стабилизированная линолевой кислотой 68
Миндубаев М.Г. Течение тейлора-куэтта в однородном магнитном поле с радиальной стратификацией по плотности 69
Минина Е., Канторович С. Методы вычисления вириальных коэффициентов для магнитной жидкости в условиях пространственных ограничений 70
Молоков С.Ю., Педченко А.В. Магнитогидродинамические эффекты в алюминиевых электролизерах 71
Муратова А., Канторович С. Анализ коэффициента диффузии как функции параметра дипольного взаимодействия и геометрии образца 72
Налетова В.А., Турков В.А., Пелевина Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование объема магнитной жидкости вокруг твердого намагничивающегося тела в однородном магнитном поле 73
Носков В.И., Фрик П.Г., Денисов С.А., Степанов Р.А. Турбулентное винтовое течение жидкого натрия в толстом торе 74
Оборин П.А., Колесниченко И.В. Исследование течения и кристаллизации жидкого металла в плоском слое с перемешиванием 75
Оборин П.А., Хрипченко С.Ю. Перемешивание жидкого металла в прямоугольной полости бегущим магнитным полем 76
Орлов В.А., Паксютов К.В. Эффективный преобразователь электромагнитной энергии в механическую и тепловую 77
Павлинов А.М. Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Miralles S., Plihon N. Исследование пульсаций поля скорости в цилиндрическом канале с магнитным полем 78
Педченко А.В., Молоков С.Ю. Экспериментальная модель МГД-неустойчивости поверхности жидкого металла в алюминиевых электролизерах 79
Пипин В.В. Турбулентный перенос крупномасштабных магнитных полей в конвективной зоне Солнца индуцированный спиральностью и дифференциальным вращением 80

Полунин В.М. Акустомагнитный эффект в магнитной жидкости. Теория, эксперимент, применение 81
Полунин В.М., Боев М.Л., Мьо Мин Тан, Сычев Г.Т. Вибрационное течение магнитной жидкости с воздушной полостью, удерживаемой силами левитации 82
Полунин В.М., Стороженко А.М. Об оценке размеров наиболее мелких частиц магнитной жидкости 83
Попова Е.П. Маломодовое приближение в задаче динамо в случае дипольной и квадрупольной симметрий магнитного поля 84
Прокопьева Т.А., Канторович С.С. Магнитные свойства феррожидкостей, в которых частицы обладают магнитным моментом, смещенным относительно центра масс 85
Пшеничников А.Ф. О фазовых переходах в магнитных жидкостях с сильными магнитодипольными взаимодействиями 86
Пшеничников А.Ф., Кузнецов А.А. Равновесная восприимчивость 87
концентрированных ферроколоидов: численное моделирование 88
Пьянзина Е.С., Канторович С.С. Магнитные жидкости с анизотропными частицами
Рамазанова А.Г., Королев В.В., Яшкова В.И., Балмасова О.В. Физико–химические свойства магнитных жидкостей на основе синтетического масла «АЛКАРЕН» 89
Садилов Е.С. Влияние быстро вращающегося магнитного поля на устойчивость конвективных течений в горизонтальном слое жидкости со свободными границами 90
Седых П.А. Преобразование параметров плазмы солнечного ветра при переходе через фронт головной ударной волны 91
Семко А.Н., Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Казак О.В. Методика моделирования 92
ЭВТ 93
Соколов Д.Д. Динамо средних полей с флуктуирующими значениями параметров
Соловьева А.Ю., Екатеринчук Е.А., Иванов А.О., Елфимова Е.А. Намагниченность 94
концентрированных феррожидкостей: влияние многочастичных корреляций 95
Старченко С.В. Коррекция основ магнитогидродинамики и теории динамо 96
Степанов Р.А. Роль спиральности в каскадных процессах МГД турбулентности
Теймуразов А.С., Фрик П.Г. Исследование конвективного течения жидкого магния в замкнутом объеме 97
Ткачева Е.С., Закинян А.Р., Диканский Ю.И. Изгибная деформация жидкой диэлектрической полосы в тонком слое магнитной жидкости во внешних полях 98
Фрик П.Г., Носков В.И., Денисов С.А., Степанов Р.А. Экспериментальные исследования турбулентных коэффициентов переноса в турбулентных потоках жидких металлов 99
Хачай Ю.В. МГД–процесс в слое гравитирующей сферы увеличивающегося радиуса 100
Хрипченко С.Ю., Долгих В.М., Денисов С.А., Никулин Л.В., Колесниченко И.В., Заякин В.Я. Кристаллизация цилиндрических алюминиевых слитков при МГД-перемешивании 101
Хрипченко С.Ю., Долгих В.М., Денисов С.А., Колесниченко И.В. МГД–принципы в металлургических приложениях 102
Цаплин А.И., Никулин И.Л., Перминов А.В. Конвекция проводящей жидкости в неоднородном переменном магнитном поле 103
Чупин А.В., Степанов Р.А., Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Бек Р. Помасштабный вейвлет-анализ поляризационных данных галактики NGC 6946 104
Шалыбков Д.А. Ассиметричная неустойчивость цилиндрического течения Куэтта с неоднородной плотностью 105
Шалыбков Д.А. Устойчивость цилиндрического течения Куэтта с неоднородным осевым магнитным полем 106
Яновский А.А., Симоновский А.Я. Гидрогазодинамические явления в кипящей магнитной жидкости 107
Ячиков И.М., Портнова И.В. Моделирование электровихревых течений в токонесущих расплавах металлургических агрегатов 108

МГД-ТЕЧЕНИЕ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ В НЕОДНОРОДНОМ ПО ДЛИНЕ ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.М. Анисимов, И.Р. Кириллов, Д.М. Обухов, Г.В. Преслицкий

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, С-Петербург, Россия

В докладе представлены результаты экспериментального исследования МГД-течения в круглой трубе с электропроводящими стенками в неоднородном по длине поперечном магнитном поле. МГД-течения в магнитном поле такого вида характерны для труб подвода и отвода теплоносителя/бридера в бланкетах термоядерных реакторов (ТЯР) и в испытательном модуле бланкета (ИМБ) ИТЭР. Данная работа проводилась в рамках разработки российского ИМБ с керамическим бридером и свинцово-литиевой эвтектикой, осуществляемой совместно НИИЭФА и НИКИЭТ. Целью исследования была проверка методики расчета МГД-потерь давления, подробно изложенная в [1].

Исследования проводились в НИИЭФА на стенде для исследования термогидравлических характеристик ИМБ. Максимальное значение индукции магнитного поля в экспериментах составляло 1 Тл, рабочая среда — сплав натрий-калий. В процессе исследований были получены распределение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита, распределение давления по длине круглой трубы для различных значений расхода жидкого металла.

Показано, что в первом приближении МГД потери давления в неоднородном по длине поперечном магнитном поле для круглой трубы с электропроводящими стенками могут быть оценены с использованием методики для развитого течения в однородном магнитном поле [1]:

$\Delta p_{неодн} = k_p \sigma V_0 \int B^2(x)\,dx$, где k_p $c = \dfrac{\sigma_w\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\sigma\left(r_o^2 + r_i^2\right)}$ — параметр проводимости стенок трубы, σ и σ_w — электрические проводимости жидкого металла и стенок канала, V_0 — средняя скорость жидкого металла, r_0 и r_i — внешний и внутренний радиусы трубы, $B(x)$ — распределение индукции магнитного поля по длине трубы.

Потери давления под действием трехмерных эффектов в зоне относительно сильного градиента магнитного поля в эксперименте составляют не более 15% от полных потерь давления, что можно рассматривать как оценку сверху для случаев более слабого градиента поля, в том числе и для труб круглого сечения ИМБ ИТЭР.

1. *Kirillov I.R. et al. Present understanding of MHD and heat transfer phenomena for liquid metal blankets // Fusion Engineering and Design. – 1995. – V. 27. – P. 553-569.*

ВЫСШИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ В МГД

П.М. Ахметьев

ИЗМИРАН, Троицк, Россия

Non-local asymptotic invariants of magnetic fields for the ideal magnetohydrodynamics are introduced in [1]. The velocity of variation of the simplest invariant for a non-ideal magnetohydrodynamics with a small magnetic dissipation is estimated. By means the invariants spectra of electromagnetic fields are investigated. A possible role of higher magnetic helicities during a relaxation of magnetic fields is discussed.

1. *Akhmet'ev P.M. Quadratic helicities and the energy of magnetic fields. arXiv:1110.0997 to appear in Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics – 2012.*

СТАЦИОНАРНЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВИХРЬ В ВЯЗКОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

А.Н. Байкин[1], С.В. Головин[1,2]

[1]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[2]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

Вихревые течения электропроводной жидкости широко распространены в природе и технике. Локализованные вихревые структуры в жидком ядре Земли принимают участие в генерации её магнитного поля [1]. Моделирование динамо-процессов в экспериментальных установках с жидкими металлами также существенно использует различные типы вихревых течений [2, 3].

В настоящей работе построено точное решение уравнений магнитогидродинамики, описывающее стационарный цилиндрический вихрь внутри покоящегося полубесконечного цилиндра, содержащего на оси проводник с текущим по нему заданным током. Жидкость предполагается вязкой с конечной электрической проводимостью. Кинематика описанного движения полностью совпадает с вихревым течением, описанным в работе [4]. Магнитное поле имеет только осевую и азимутальную компоненты в цилиндрической системе координат. Действие силы Лоренца компенсируется изменением давления.

В рассмотренном случае ненулевой кинематической вязкости течение жидкости происходит от периферии к оси цилиндра под действием разности давлений, при этом поток разворачивается и завихряется. Течение жидкости концентрирует магнитные линии вблизи оси цилиндра, обеспечивая экспоненциальное убывание магнитного поля при удалении от оси. При рассмотрении течений жидкости с нулевой кинематической вязкостью, но конечной электрической проводимостью, удается описать более сложные структуры течения жидкости, когда линии тока приближаются к некоторым цилиндрам, соосным основному. В этом случае картина магнитных линий также усложняется.

Полученные классы точных решений могут быть полезны при теоретическом исследовании завихренных течений электропроводной жидкости, а также при тестировании численных алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке Президентской программы поддержки ведущих научных школ (НШ-6706.2012.1) и молодых докторов наук (МД-168.2011.1).

1. *Davidson P.A. An introduction to magnetohydrodynamics. – Cambridge Univ. Press, 2001.*
2. *Stefani F., Gailitis A., Gerbeth G. Magnetohydrodynamic experiments on cosmic magnetic fields // ZAMM. – 2008. – V. 88, Issue 12. – P. 930-954.*
3. *Dobler W., Frick P., Stepanov R. The screw dynamo in a time-dependent pipe flow // Phys. Rev. E. – 2003. – V. 67. – 056309.*
4. *Аристов С.Н. Стационарный цилиндрический вихрь в вязкой жидкости // ДАН. – 2001. – Т. 377, N. 4.*

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ НАФТЕНОВОЙ КИСЛОТЫ ИЗ РАСТВОРОВ ГЕПТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА

О.В. Балмасова, А.Г. Рамазанова, В.В. Королев

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

Изучение адсорбционных процессов на высокодисперсных магнитных адсорбентах, в частности на поверхности высокодисперсного магнетита, является актуальной задачей, поскольку магнитные наночастицы широко используются в производстве магнитных жидкостей, в магнитных охлаждающих системах, для магнитной транспортировки лекарственных препаратов.

Цель настоящей работы заключалась в продолжение исследования влияния природы поверхностно–активного вещества (ПАВ) и растворителя на процессы адсорбции, происходящие на поверхности феррита железа. Ранее были получены изотермы адсорбции олеиновой, линолевой и линоленовой кислот из органических растворителей и рассчитаны их параметры.

В данной работе в качестве ПАВ была выбрана нафтеновая кислота ($C_7H_{10}O_2$), а в качестве растворителя — гептан. Адсорбция проводилась при температурах 293÷308 К.

Выбор объектов исследования обусловлен тем, что нафтеновая кислота используется в качестве стабилизатора при синтезе магнитных жидкостей, имеет низкую температуру затвердевания (–30^{0}С), обладает большим сродством к кремнийорганическим жидкостям по сравнению с другими стабилизаторами, что позволяет получить более устойчивые магнитные жидкости.

Адсорбцию нафтеновой кислоты из растворов в гептане на поверхности феррита железа проводили при помощи адсорбционной ячейки с дозированием исходного раствора кислоты
в данном растворителе в суспензию феррит – растворитель при температуре 298 К. Для седиментации магнитных частиц адсорбента использовали магнитное поле. Равновесные концентрации растворов кислот после каждой дозы определяли ИК–спектроскопическим методом количественного анализа. По экспериментальным данным были построены изотермы адсорбции жирных кислот. Для описания изотерм адсорбции использовали теорию объемного заполнения микропор, на основании которой были рассчитаны величины предельной адсорбции, характеристическая энергия и объём пористого пространства.

В ходе исследований определено, что при всех температурах для нафтеновой кислоты в области равновесных концентраций 0÷10 ммоль/л процесс адсорбции происходит по механизму объемного заполнения пористого пространства феррита сорбционным раствором, с последующей конденсацией исследуемого ПАВ в макропорах и на внешней поверхности частиц адсорбента, что вызывает дальнейший рост величины адсорбции. Этот вывод согласуется с литературными данными [1]. В области равновесных концентраций нафтеновой кислоты 10 ÷ 15 ммоль/л на изотерме наблюдается перегиб, который связан с изменением ориентации молекул на поверхности адсорбента, а также с процессом конденсации адсорбционного раствора ПАВ в макропорах.

Анализируя данные, полученные в ходе исследования, видно, что величина предельной адсорбции для нафтеновой кислоты из раствора гептана при температуре 298 К (1.1 ммоль/г) ниже, чем для олеиновой кислоты из того же растворителя (1.6 ммоль/л). Вероятно, это связано с возрастанием влияния стерического эффекта, который обусловлен циклическим строением молекулы нафтеновой кислоты. Установлено, что с ростом температуры величина предельной адсорбции уменьшается при 293 К a_m = 2.3 ммоль/г, при 308 К a_m = 0.3 ммоль/г.

1. *Шаронов Н.Ю., Улитин М.Ю., Буданов М.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2009. – Т. 52, Вып. 4. – С. 11-14.*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В ТОРОИДАЛЬНОМ КАНАЛЕ

В.Г. Баталов, А.Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

В данной работе мы возвращаемся к исследованию винтового течения воды в замкнутом тороидальном канале. Ранее была проведена серия экспериментальных исследований, в ходе которых удалось показать возможность формирования спирального течения в замкнутом тороидальном канале, получить временные зависимости азимутальной компоненты скорости на входе и выходе дивертора [1, 2]. Данные измерения были проведены для двух моделей с различными значениями радиуса тора R и радиуса канала r ($R1$=103, $r1$=0.027 и $R2$=154, $r2$=0.04), но с близкими значениями аспектного отношения a = 0.26.

Исследования МГД-процессов в винтовом потоке жидкого натрия показали, что величина аспектного отношения является важным параметром и возможно существенно влияет на структуру винтового течения в тороидальном канале.

Проводить измерения гидродинамических характеристик винтовых течений в жидком натрии чрезвычайно сложно, так как жидкий натрий это непрозрачная и достаточно агрессивная среда.

Целью нашей работы является изучение структуры винтового потока воды в плексигласовом торе, для двух различных значений аспектного отношения, при помощи скоростной видеокамеры. В ходе работы были проведены измерения для различных начальных условий (скоростей вращения тороидального канала), исследована эволюция винтового потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-01-96000).

1. *Денисов С.А., Носков В.И., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Нестационарные турбулентные винтовые течения в кольцевом канале // Изв. РАН. МЖГ. – 2001. – N. 4.*
2. *Frick P., Noskov V., Denisov S., Khripchenko S., Sokoloff D., Stepanov R., Sukhanovsky A. Non-stationary screw flow in a toroidal channel: way to a laboratory dynamo experiment // Magnetohydrodynamics. – 2002. – V. 38, N. 1-2. – P. 143-162.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, Аль-Джаиш Таха Малик Мансур

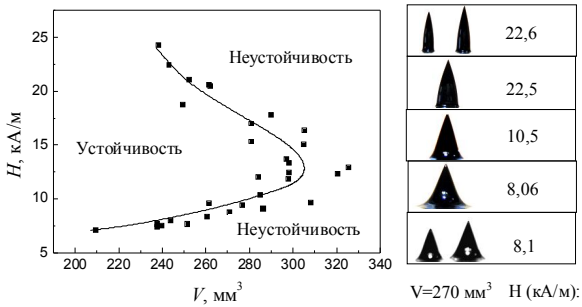
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Одним из интересных явлений, наблюдаемых в объемах магнитной жидкости, ограниченных частично свободной и твердыми поверхностями, является их распад на части при определенных критических значениях однородного магнитного поля, так называемая топологическая неустойчивость [1–2].

Проведенные в настоящей работе экспериментальные исследования в широком диапазоне напряженности магнитного поля *H* и намагниченности насыщения магнитной жидкости показали, что изначально сформированная капля магнитной жидкости расположенная на горизонтальной плоской поверхности в перпендикулярном к ней однородном магнитном поле, проявляет топологическую неустойчивость как при последующем увеличении напряженности магнитного поля, так и при ее уменьшении. Таким образом, топологическая неустойчивость капли характеризуется двумя критическими значениями напряженности — верхним и нижним, которые зависят от намагниченности жидкости и начального объема капли.

Характерной особенностью в этом процессе является изменение формы боковой поверхности капли с выпуклой на вогнутую.

Типичные зависимости критических значений напряженности магнитного поля *H* от объема капли *V* и соответствующие формы капли магнитной жидкости на основе керосина МК-52
с намагниченностью насыщения 52,1 кА/м представлены ниже на рисунке.



Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

1. *Барков Ю.Д., Берковский Б.М. Распад капли намагничивающейся жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1980. – № 3. – С. 11-14.*
2. *Берковский Б.М., Баштовой В.Г., Рекс А.Г. О некоторых новых равновесных формах свободной поверхности ограниченных объемов магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1986. - № 4. – С. 11-16.*

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОФОРЕЗА И БРОУНОВСКОЙ ДИФФУЗИИ НА ПЛАВАНИЕ ТЕЛ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, С.В. Климович, А.А. Моцар

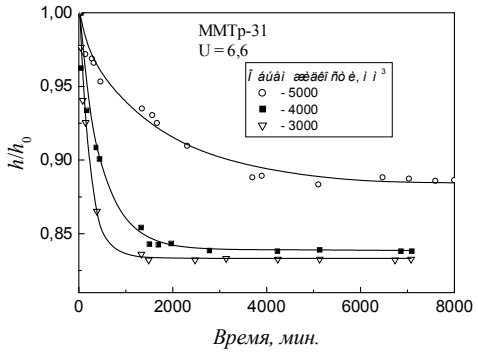
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Работа посвящена исследованию процессов магнитофореза и броуновской диффузии в неоднородном магнитном поле постоянного магнита, Неоднородное поле приводит к перераспределению концентрации магнитных частиц в объеме магнитной жидкости [1], в результате чего происходит перераспределение давления вокруг магнита и изменение условий плавания этого магнита в магнитной жидкости.

В исследованиях использован набор магнитных жидкостей на основе керосина и трансформаторного масла. Объем магнитной жидкости варьировался от 3000 до 5000 мм^3. В качестве источников неоднородного магнитного поля использованы прямоугольные феррит бариевый и самарий-кобальтовый магниты с геометрическими размерами 10x20x5 мм и 10x24x5 мм. Магниты обеспечивали в объеме магнитной жидкости напряженность поля до 120 кА/м и его градиент до 20000 кА/м^2.

Интенсивность диффузионных процессов и броуновского движения в магнитной жидкости определяется безразмерным параметром $U = \mu_0 m_m H_0 / kT$, характеризующим соотношение энергии магнитной частицы в магнитном поле и энергии теплового движения.

Вследствие диффузионных процессов в магнитной жидкости равновесное положение магнита изменяется со временем — магнит опускается ближе ко дну кюветы. Наиболее интенсивно изменение положения происходит в начальный момент времени в течение двух-трех часов, а далее положение магнита выходит на стационарное значение. При большем параметре U изменение положения магнита происходит интенсивнее.



Установлено влияние концентрации магнитных частиц на процесс их перераспределения и, соответственно, на изменение положения магнита во времени.

Влияние объема магнитной жидкости на зависимость изменения положения магнита со временем иллюстрируется приведенным рисунком (h_0 — начальное положение магнита). При малом объеме жидкости зазор между магнитом и дном кюветы мал, магнитная жидкость в виде тонкого слоя находится вблизи поверхности магнита в области максимальных полей и градиентов. В этом слое жидкости происходит более интенсивное перемещение магнитных частиц к поверхности магнита и локализуется область повышенного давления. При большом объеме жидкости зазор между магнитом и дном велик, магнитные частицы вблизи дна кюветы находятся в области более слабых полей, их взаимодействие с полем менее интенсивно, в результате чего перемещения магнита значительно меньше.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

1. *Bashtovoi V.G. et al. Influence of Brownian Diffusion on Statics of Magnetic Fluid // Magnetohydrodynamics. – 2007. – V. 43, N. 1. – P. 3-11.*

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА И МГД-СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОТОКА ЭВТЕКТИКИ СВИНЕЦ-ВИСМУТ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМАМ ТЕПЛООТВОДА БЛАНКЕТА ТОКАМАКА

А.В. Безносов, О.О. Новожилова, С.Ю. Савинов, М.В. Ярмонов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Одной из ключевых научно технических проблем при создании термоядерного реактора (ТЯР) является обоснование выбора теплоносителя для систем теплоотвода бланкета и дивертора токамака. Традиционно рассматривается литий. Перспективными теплоносителями также являются такие тяжелые жидкие металлы как свинец, галлий, эвтектики свинец-висмут и свинец-литий, в первую очередь по соображениям безопасности.

В системах теплоотвода ТЯР течение теплоносителя происходит в мощном магнитном поле, необходимом для удержания плазмы. Наличие магнитного поля при использовании жидкометаллических теплоносителей приводит к значительному изменению характеристик гидравлического сопротивления и теплообмена между потоком теплоносителя и теплообменной поверхностью оборудования.

Для снижения влияния магнитного поля на поток жидкого металла необходимо формирование электроизолирующих покрытий (ЭИП) на поверхностях, ограничивающих поток жидкого металла, обладающих высоким электрическим сопротивлением. Авторами были проведены исследования характеристик данных покрытий. В системах теплообмена с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) эту роль выполняют оксидные покрытия на стенках каналов, формируемые путём обработки теплоносителя кислородом. Содержание кислорода в теплоносителе и характеристики ЭИП, определяемые этим содержанием, являются ключевыми параметрами, влияющими на процесс теплообмена, гидродинамику и коррозионную стойкость материалов при течении ТЖМТ в магнитном поле.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные работы, в которых характеристики теплообмена и МГД-сопротивление потока ТЖМТ исследуются одновременно. Разработка (уточнение) расчётных методик, расчётных формул теплообмена и гидравлического сопротивления каналов в системах с ТЖМТ, работающих в магнитном поле при контролируемых и регулируемых содержании примеси кислорода и характеристиках оксидных ЭИП, и определение содержания кислорода в ТЖМТ, оптимальное при совместном учёте гидродинамики и теплообмена в этих условиях являются необходимыми для выбора и разработки концепций систем теплоотвода ТЯР типа токамак.

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по обоснованным инженерным расчётным формулам теплообмена и полного гидравлического сопротивления при течении свинец-висмутового теплоносителя в поперечном магнитном поле во всём диапазоне содержания примеси кислорода, возможного при эксплуатации, и определение оптимального содержания примеси кислорода в эвтектике, при котором происходит наиболее эффективное снижение МГД-сопротивление при минимально возможном ухудшении теплообмена.

РАЗВИТИЕ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ НА ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ТРУБЕ

И.А. Беляев[1], Я.И. Листратов[1], Н.Г. Разуванов[2], В.Г. Свиридов[1]

[1]*НИУ МЭИ, Москва, Россия*
[2]*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

В работе проведен анализ экспериментальных данных, полученных в ходе комплексных исследований, проводимых на уникальном ртутном МГД-стенде, объединяющем установки МЭИ и ОИВТРАН, существующие при поддержке Минобрнауки. Исследования проводились в трубе зондовым методом при помощи микротермопар. Модельная жидкость — ртуть позволяет получить высокую точность измерений температурных полей и теплоотдачи.

Первоначальные исследования теплообмена жидкого металла проводились в условиях минимизации воздействия термогравитационной конвекции (ТГК) [1]. В настоящей работе рассматриваются существенные эффекты воздействия ТГК на теплообмен жидкого металла при наличии магнитного поля (МП) различной ориентации.

Гидродинамика течения жидкого металла в продольном и поперечном МП существенно различается [2]. Ориентация канала в пространстве также оказывает сильное влияние на развитие ТГК. МП однозначно подавляет турбулентность, в первую очередь высокочастотные компоненты. Однако в вертикальных трубах в МП в некоторых режимах под действием встречной ТГК наблюдается образование крупномасштабных вихревых структур, приводящих к возникновению пульсаций температуры аномальной высокой интенсивности. В горизонтальной обогреваемой трубе формируется ТГК в виде одного или двух вихрей с продольными осями, вследствие чего возникают зоны ухудшенной и улучшенной теплоотдачи, что приводит к весьма значительным термическим напряжениям в стенке. Эти вихри стабилизируются и даже усиливаются в продольном МП и подавляются в поперечном МП.

Существенную роль в формировании ТГК играет неоднородность обогрева по периметру [3]. Поперечное МП в некоторых режимах с обогревом нижней стороны трубы формирует необычную структуру ТГК, ориентируя вторичные вихри вдоль индукции МП. Этот эффект также приводит к появлению низкочастотных пульсаций температуры аномальной интенсивности, которые обнаружены в эксперименте. Механизм явления подтверждается численным моделированием [4].

В наклонной трубе с относительно небольшим углом к горизонтали (13 градусов) результаты, в общем, идентичны результатам, полученным в горизонтальной трубе за исключением некоторых режимов с неоднородным обогревом, где наблюдаются существенные отличия.

Эффекты, связанные с совместным влиянием ТГК и МП значительны, их необходимо учитывать при проектировании теплообменников термоядерных реакторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

1. *Sviridov V.G., Shpansky Yu.S., Razuvanov N.G. Liquid Metal Heat Transfer under the Condition of Fusion Tokamak Reactor // Proc. Of Turbulence, Heat and Mass Transfer Conference, Lisbon, Portugal, 1994. –P. 12.4.1-12.4.6.*
2. *Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. – М.: Мир, 1967. – 321 с.*
3. *Влияние вторичных течений на теплообмен жидкого металла в горизонтальной трубе при неоднородном обогреве в магнитном поле / В.Г. Жилин, В.Г. Свиридов, Н.Г. Разуванов, Ю.П. Ивочкин, Я.И. Листратов, Е.В. Свиридов, И.А. Беляев // Тепловые процессы в технике. – 2009. - Т. 1. – С. 199-203.*
4. *Genin L.G., Zhilin V.G., Ivochkin Yu.P., Razuvanov N.G., BelyaevI.A., ListratovYa.I., Sviridov V.G. Temperature fluctuations in a heated horizontal tube affected by transverse magnetic field // Proc. of the 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, France, 2011. – P. 37-43.*

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ ПОЛОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

А.А. Божко, М.Т. Кучукова, Г.Ф. Путин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Влияние внешнего однородного магнитного поля на конвективные течения в магнитополяризующихся средах традиционно рассматривается для ситуаций, когда возникает температурная неоднородность намагниченности в слоях толщиной порядка миллиметра [1, 2], либо, когда неоднородность магнитного поля внутри полости обусловлена ее геометрией [3, 4].

В данной работе представляются результаты экспериментального исследования действия внешнего однородного магнитного поля на устойчивость конвективных течений в шаровой полости магнитной жидкости диаметром 16 мм, внутри которой в изотермической ситуации магнитное поле сохраняет свою однородность [5]. Полость была выфрезерована в массиве из плексигласа; отношение теплопроводностей массива и рабочей жидкости равна примерно единице. В опытах использовались магнитные жидкости на основе керосина и полиэтилсилоксана со средним размером магнетитовых частиц 10 нм, стабилизированных олеиновой кислотой. Магнитное поле, напряженностью до 56 кА/м, создавалось при помощи катушек Гельмгольца.

Показано, что при подогреве шаровой полости магнитной жидкости снизу и обогреве сбоку в случаях, когда градиент температуры и напряженность магнитного поля параллельны или перпендикулярны друг другу, наблюдается торможение конвективного вихря вплоть до полной его остановки. Значения напряженностей магнитного поля, при которых конвективное движение полностью угасает, зависит от величины перепада температур, прикладываемого к полюсам сферы. При подогреве снизу в горизонтальном магнитном поле помимо стабилизирующего влияния наблюдалось выстраивание оси конвективного вала вдоль вектора напряженности магнитного поля. При обогреве сбоку для случаев, когда вектор угловой скорости конвективного вихря сонаправлен или перпендикулярен вектору напряженности магнитного поля, прекращение конвективного теплообмена происходило при одних и тех значениях величины магнитного поля.

1. *Schwab L., Hildebrandt U., Stierstadt K. Magnetic Benard convection // J. Magn. Magn. Mater. – 1983. – V. 39. – P. 113–114.*
2. *Ujihara A., Tagawa T., Ozoe H. Average heat transfer rates measured in two different temperature ranges for magnetic convection of horizontal water layer heated from below // Int. J. Heat Mass Trans. – 2006. – V. 49. – P. 3555–3560.*
3. *Kaneda M., Tagawa T., Ozoe H. Convection induced by a cuspshaped magnetic field for air in a cube heated from above and cooled from below // J. Heat Trans. – 2002. – V. 124. – P. 17–25.*
4. *Krakov M.S., Nikiforov I.V., Reks A.G. Influence of the uniform magnetic field on natural convection in cubic enclosure: experiment and numerical simulation // J. Magn. Magn. Mater. – 2005. – V. 289. – P. 272–274.*
5. *Ландау Л.Д., Лившиц И.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.*

О МЕХАНИЗМАХ КОНВЕКЦИИ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

А.А. Божко, Г.Ф. Путин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Специфика теплофизических явлений в магнитных наносуспензиях определяется наличием по сравнению с однокомпонентными средами дополнительных механизмов тепло- и массопереноса, таких как: термо- и магнитодиффузия, седиментация. Экспериментальное изучение конвекции в магнитных жидкостях, с одной стороны, углубляет понимание сложных режимов конвекции в наножидкостях разного состава [1–3], а с другой стороны, обогащает исследования по взаимодействию магнитного поля с непроводящими магнитополяризующимися средами [4, 5].

При гравитационной конвекции магнитных жидкостей в условиях подогрева снизу надкритические течения имеют колебательный характер, обусловленный конкуренцией между градиентами плотности тепловой, термодиффузионной и барометрической природы. В горизонтальном и наклонном слоях обнаружены поперечно-валиковая неустойчивость и нерегулярные движения конвективных валов, самопроизвольное возникновение спиральных структур и случайное перемещение бесконвективных пятен. В шаровой полости найдены режимы, в которых гармонические и релаксационные колебания перемежаются стационарными движениями и переходами от развитого течения к неподвижному состоянию и обратно.

В случае наложения внешнего однородного магнитного поля происходит изменение условий возбуждения и структур конвективных течений в ферроколлоиде. Например, в подогреваемом снизу наклонном слое обнаружен эффект подавления рэлеевской конвекции продольным горизонтальным магнитным полем, а при соизмеримом вкладе термогравитационного и термомагнитного механизмов происходит образование уединенных бегущих вихрей.

Таким образом, для успешного использования магнитных коллоидов в различных теплообменных устройствах наряду с термогравитационным и термомагнитным механизмами конвекции необходимо учитывать концентрационно-гравитационные и концентрационно-магнитные способы тепло- и массопереноса.

1. *Donzelli G., Cerbino R., Vailati A. Bistable heat transfer in a nanofluid // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 102. – P. 104503 (4).*
2. *Pakravan H.A., Yaghoubi M. Combined thermophoresis, Brownian motion and Dufour effects on natural convection of nanofluids // Int. J. Thermal Science. – 2011. – V. 50. – P. 394-402.*
3. *Sunil, Sharma P., Mahajan A. A nonlinear stability analysis of a rotating double-diffusive magnetized ferrofluid // Appl. Math. Computation. – 2011. – V. 21. – P. 2785-2799.*
4. *Ramachandran N., Leslie F.W. Using magnetic fields to control convection during protein crystallization – analysis and validation studies // J. Crystal Growth. – 2005. – V. 274. – P. 297−306.*
5. *Boulware J.C., Ban H., Jensen S., Wassom S. Influence of geometry on liquid oxygen magnetohydrodynamics // Exp. Thermal Fluid Science. – 2010. – V. 34. – P. 1182−1193.*

ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ВОЛНОВЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

А.А. Божко[1], Г.Ф. Путин[1], А.С. Сидоров[1], С.А. Суслов[2]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[2]*Свинбургский технический университет, Мельбурн, Австралия*

Классическая задача об устойчивости первичного конвективного течения в подогреваемом сбоку вертикальном слое магнитной жидкости [1] исследуется для случая, когда возникает добавочный термомагнитный перенос тепла во внешнем однородном поперечном магнитном поле. Гравитационные числа Грасгофа, реализуемые в экспериментах, находятся ниже порога возбуждения температурных волн и стационарной моды неустойчивости при наличии продольного градиента температуры [1]. Обнаруженные в теории [2] и зарегистрированные в опытах волновые режимы имеют термомагнитную природу: менее нагретая жидкость с большей намагниченностью втягивается в область с большей напряженностью магнитного поля. Реализуемые в эксперименте магнитные поля отвечают линейному участку кривой намагничивания, для которого и были выполнены численные расчеты.

В экспериментах использовались конвективные камеры с различными отношениями высоты слоя к толщине. Для визуализации течений применялись термочувствительная жидкокристаллическая пленка или тепловизионная камера. Когда скорость течения небольшая (~ мм/с), соотношение между поперечной компонентой скорости и конвективными искажениями температурного поля линейное, поэтому изменения цвета термоиндикатора или тепловизора могут использоваться для наблюдений за структурой течений и оценки их интенсивности. Опыты проводились с ферроколлоидом на основе керосина со средним размером частиц 10 нм, намагниченностью насыщения 43 кА/м, магнитной восприимчивостью 2.88, динамической вязкостью $7.66 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Проведено исследование эволюции пространственно-временных структур волновых движений, построены карты устойчивости термогравитационного и термомагнитных течений, выполнен Фурье-анализ для колебательных режимов термомагнитной конвекции.

1. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. – М.: Наука, 1989. – 320 с.*
2. *Suslov S.A. Thermomagnetic convection in a vertical layer of ferromagnetic fluid // Phys. Fluids. – 2008. – V. 20. – P. 084101 (36).*

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФЕРРОНЕМАТИКЕ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Н. Бойчук, А.Н. Захлевных, Д.В. Макаров

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

При помещении в магнитное поле жидкого кристалла (ЖК), обладающего положительной диамагнитной анизотропией, его молекулы стремятся ориентироваться своими длинными осями вдоль направления поля [1]. В случае стационарного вращения магнитного поля, как было показано Цветковым, жидкий кристалл может быть вовлечен во вращение. Несмотря на то, что анизотропия диамагнитной восприимчивости ЖК позволяет изменить его ориентационную структуру с помощью внешнего магнитного поля, для увеличения магнитной восприимчивости жидкокристаллического образца Брошар и де Жен [2] предложили внедрять игольчатые магнитные частицы в матрицу нематического жидкого кристалла. Полученная таким образом магнитная суспензия, для которой характерна сильная ориентационная связь между ЖК-матрицей и магнитными частицами, получила название ферронематика. Сцепление магнитных частиц с молекулами жидкого кристалла обусловливает наличие двух механизмов влияния магнитного поля на ориентационную структуру ферронематика: квадрупольного (воздействие на нематическую матрицу) и дипольного (воздействие на магнитные частицы). При наложении внешнего магнитного поля к ферронематику эти механизмы приводят к различным типам упорядочения его структуры [3], т.е. различным ориентационным фазам. Исследований, посвященных влиянию вращения магнитного поля на структуру и границы этих фаз, до настоящего времени не проводилось.

В работе изучено поведение ориентационной структуры ферронематика в однородном вращающемся магнитном поле на основе обобщенной континуальной теории Эриксена-Лесли [1, 4, 5]. Сцепление директора жидкого кристалла с поверхностью магнитных частиц считалось мягким (т.е. угол между директором и намагниченностью изменяется под действием внешнего поля) и гомеотропным (в отсутствие магнитного поля директор ортогонален вектору намагниченности). Получена нестационарная система уравнений, описывающая ориентационную структуру ферронематика во вращающемся магнитном поле. Произведен численный расчет углов поворота директора и вектора намагниченности относительно направления магнитного поля как функций времени для различных значений напряженности и скорости вращения магнитного поля, энергии сцепления магнитных частиц с ЖК-матрицей. Проанализированы стационарные и нестационарные решения системы уравнений, описывающей динамику ферронематика. Обнаружено, что с увеличением угловой скорости вращения магнитного поля при фиксированных значениях энергии сцепления и напряженности магнитного поля стационарные состояния системы исчезают и появляются нестационарные периодические во времени решения. Получена зависимость критической угловой скорости вращения магнитного поля от напряженности магнитного поля, определяющей границу существования стационарных решений системы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-96030).

1. *Gennes P.G. de, Prost J. The Physics of liquid crystals. – Oxford: Clarendon Press, 1993. –596 p.*
2. *Brochard F, de Gennes P.G. Theory of magnetic suspensions in liquid crystals // J. Phys. (France). – 1970. – V. 31. – P. 691.*
3. *Zakhlevnykh A.N. Threshold magnetic fields and Freedericksz transition in a ferronematic // J. Magn. Magn. Mater. – 2004. – V. 269. – P. 238.*
4. *Raikher Y.L., Stepanov V.I. Dynamic magneto-optical response of ferronematic liquid crystals // J. Int. Mater. Syst. Struct. – 1996. – V. 7. – P. 550.*
5. *Makarov D.V., Zakhlevnykh A.N. Magnetic field-induced orientational phases of ferronematics in shear flow // J. Magn. Magn. Mater. – 2008.– V. 320. – P. 1312.*

О КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ

Е.Н. Буркова[1], А.Ф. Пшеничников[2]

[1] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[2] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

Работа посвящена исследованию пространственной сегрегации частиц в концентрированной магнитной жидкости, заполняющей полость с непроницаемыми границами. На жидкость действуют однородное магнитное и гравитационное поля. Под действием магнитофореза и седиментации частиц концентрационное поле в магнитной жидкости становится неоднородным, что негативно сказывается на работе технических устройств, использующих магнитную жидкость в качестве рабочей. В приближении малой концентрации магнитной фазы и изотермических границ задача решена точно для любой конфигурации магнитного поля и любой геометрии полости [1, 2]. Однако, в случае концентрированных растворов (наиболее важном в научном и прикладном значении) возникают серьезные проблемы, связанные с присутствием в магнитной жидкости агрегатов, необходимостью учета межчастичных взаимодействий и расчета размагничивающих полей. Процесс расчета усложняется нелинейностью уравнения массобмена и появлением жесткой связи между диффузионной и магнитной частями задачи.

Задача решается численно в плоской постановке на примере полости прямоугольного сечения в бесконвективных условиях. Основными параметрами, определяющими степень разделения раствора, структуру магнитного и концентрационного полей, являются объемная доля коллоидных частиц, гравитационный параметр, имеющий смысл обратной высоты барометрического распределения, параметр Ланжевена, определенный через внешнее магнитное поле, и параметр агрегирования (отношение энергии магнитодипольных взаимодействий к энергии теплового движения). Главное внимание уделено стационарным режимам, соответствующим максимальной сегрегации частиц. Магнитное поле внутри жидкости рассчитывается итерационным методом с использованием оригинального алгоритма, описанного в [3]. Так как характерные диффузионные времена на много порядков превышают время релаксации магнитного момента частиц, намагниченность жидкости полагается равновесной. Ее величина рассчитывается в рамках модифицированной модели эффективного поля [4]. Эта модель хорошо согласуется с экспериментальными данными по намагниченности концентрированных растворов в широком диапазоне температур и магнитных полей. Учет агрегатов проведен в рамках двухфракционной модели [5].

Так как коэффициент сегрегации частиц быстро уменьшается с ростом средней по объему концентрации [1], большинство расчетов проведены для умеренных концентраций (порядка 0,1). В этом случае можно ожидать наиболее сильного взаимодействия магнитных и концентрационных полей. Приводятся изолинии концентрации при различных ориентациях магнитного поля и значениях параметра агрегирования. Подробно обсуждается расходимость коэффициента сегрегации с ростом параметра агрегирования. Обнаружено, что присутствие агрегатов в системе (даже при малых значениях параметра агрегирования и в отсутствии гравитационного поля) многократно усиливают сегрегацию частиц. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными [1].

1. *Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F. // J. Magn. Magn. Mater. – 2010. – V. 322. – P. 2575.*
2. *Pshenichnikov A.F., Elfimova E.V., Ivanov A.O. // J. Chem. Phys. – 2011. – V. 134. – 184508.*
3. *Pshenichnikov A.F. // J. Magn. Magn. Mater. – 2012. – V. 324. – P. 1342.*
4. *Ivanov A O., Kantorovich S.S. et al. // Magnetohydrodynamics. – 2007. – V. 43, N. 4. – P. 393.*
5. *Buzmakov V.M., Pshenichnikov A.F. // J. Colloid Interface Sci. – 1996. – V. 182. – P. 63.*

ДЕФОРМАЦИЯ ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ФЕРРОЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НОВЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ФЕРРОЖИДКОСТИ

К.А. Бушуева

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Известно, что пузырьки воздуха в объеме феррожидкости, как и капли немагнитной жидкости, должны вытягиваться вдоль направления магнитного поля [1]. Однако непосредственное наблюдение за подобными включениями значительно усложнено из-за непрозрачности феррожидкости и требует применения либо рентгеновского излучения для рассмотрения крупных капель [2], либо оптического микроскопа для изучения поведения микровключений в очень тонких слоях [3].

В качестве альтернативы этим методам предлагается использовать горизонтальный слой феррожидкости, расположенный на жидкой подложке и имеющий стационарный разрыв в виде правильного круга [4]. Изучение деформации такого разрыва продольным магнитным полем показывает, что он представляет собой достаточно хороший «плоский» аналог пузырька в объеме жидкости. Такое допущение позволяет значительно упростить методику эксперимента, так как отпадает необходимость в сложной визуализации пузырька в непрозрачной среде для определения его положения и формы. Кроме этого, становится ненужным учет архимедовой силы.

Для подтверждения выдвинутого предположения в работе проводится сравнительный анализ поведения устойчивых разрывов слоя и пузырьков воздуха в объеме феррожидкости в однородном продольном магнитном поле. Получены экспериментальные зависимости относительной деформации разрыва слоя и пузырька воздуха от магнитного числа Бонда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-02-96022-Урал, №10-01-96038-Урал) и Программы ОЭММПУ РАН №12-Т-1-1008.

1. *Bashtovoi V., Pogirnitskaya S., Reks A. Dynamics of deformation of magnetic fluid flat drops in a homogeneous longitudinal magnetic field // JMMM. – 1999. – V. 201. – P. 300–302.*
2. *Ishimoto J., Okubo M., Kamiyama S., Higashitani M. Bubble behavior in magnetic fluid under a nonuniform magnetic field // JSME. Int. J. Ser. B. – 1995. – V. 38, N 3. – P. 382-387.*
3. *Диканский Ю.И., Закинян А.Р. Поведение немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, Вып. 8. –С. 8–12.*
4. *Бушуева К.А., Костарев К.Г. Поведение слоя феррожидкости с устойчивым разрывом поверхности под действием тангенциально направленного магнитного поля // Изв. РАН. МЖГ. – 2011. – № 5. – С. 42–51.*

ЗАДАЧИ С ОБОСТРЕНИЕМ В МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ АТМОСФЕРЫ. ПРЕДЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ

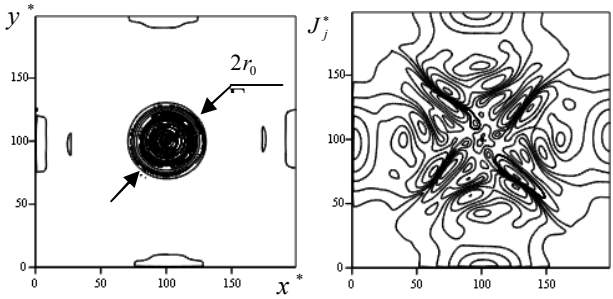
Г.П. Быстрай, И.А. Лыков, С.А. Охотников

Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

Для математического моделирования сильно неравновесных и нелинейных процессов в магнитогидродинамических средах на основе уравнений совместного переноса импульса и заряда используется термодинамический подход с модельной функцией источников и стоков, характерной для задач с обострением, когда максимум распределения скоростей и зарядов по пространству неограниченно растет за ограниченное время [1]. Он позволяет рассмотреть общий случай с учётом взаимовлияния компонент вектора скорости, а также электромагнитного поля, при наличии источников и стоков движения в плоском слое.

В основе подхода лежит уравнение для скорости изменения свободной энергии [2]. Это уравнение позволяет установить, что при самоорганизации — образовании диссипативных структур, при которой имеет место уменьшение энтропии, происходит увеличение в слое свободной энергии, а при их разрушении — увеличение энтропии, когда свободная энергия уменьшается.

Вязкость среды представлена в виде тензора второго ранга с учётом перекрёстных эффектов. В результате сформулирована более общая задача и получена взаимозависимая совместная система уравнений, которая описывает не только поведение вектора скорости для несжимаемой магнитной среды, в виде параболических уравнений переноса импульса, но и учитывает влияние электромагнитного поля.



$t = 0,0051t_0$ Рис. 1 $t = 0,0359\,t_0$

Как один из предельных случаев данной системы, рассмотрен процесс переноса заряда в атмосфере в рамках задач с обострением. Анализ показывает, что образовавшаяся структура имеет определенную фрактальность (Рис. 1, полный поток заряда в шнуре молнии в разные моменты времени) и может быть идентифицирована с развитой системой разрядов в ограниченном пространстве. Описаны области шнура и боковые ответвления от молнии. Подход позволяет объяснить фрактальную структуру токов шнура молнии, определив некоторые термодинамические характеристики, необходимые для выявления областей самоорганизации. Второй предельный случай заключается в рассмотрении переноса импульса, когда нелинейный его источник в среде приводит к режиму с обострением, а развитие данного режима, порождаемого самой нелинейной средой, ведёт к самоорганизации. Конкуренция процессов приращения и распространения импульса, приводит

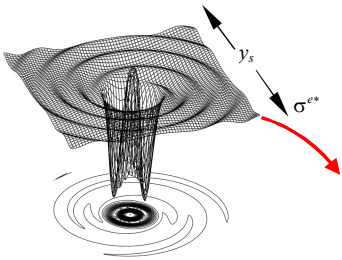


Рис. 2

к появлению новой характеристики среды: пространственного диаметра торнадо, на котором эти процессы «уравновешивают» друг друга. Подход позволяет определить скорости и градиенты давления для непотенциального турбулентного течения, а также термодинамические характеристики – производство энтропии, внешний поток (Рис. 2) и полную скорость изменения энтропии и свободной энергии, описать возникновение воронки и мезовихрей за её пределами.

1. *Самарский А.А., Курдюмов С.П., Ахромеева Т.С., Малинецкий Г.Г. Моделирование нелинейных явлений в современной науке // Информатика и научно-технический прогресс. – М.: Наука, 1987. – С. 69-91.*
2. *Быстрай Г.П., Лыков И.А., Охотников С.А. Термодинамика самоорганизующихся открытых систем. Глава 3. / Термодинамика необратимых процессов в открытых системах – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 264 с.*

ГИСТЕРЕЗИС ФОРМЫ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А.С. Виноградова[1,2], В.А. Налетова[1,2], В.А. Турков[2], А.Г. Рекс[3]

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *НИИ механики МГУ, Москва, Россия*
[3] *Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

В магнитном поле линейного проводника с током форма свободной поверхности магнитной жидкости меняется при постепенном изменении тока, причем при некоторых значениях тока форма поверхности может меняться скачкообразно. При этом в ряде случаев происходит распад исходного объема на несколько других объемов. Кроме того, может наблюдаться гистерезис формы жидкости при циклическом увеличении и уменьшении тока.

В связи с этим в [1] в случае гидроневесомости нами рассмотрена задача о магнитной жидкости, перекрывающей зазор между двумя коаксиальными цилиндрами кругового сечения, на оси которых находится линейный проводник с током. Поверхность магнитной жидкости есть поверхность вращения, и магнитное поле проводника не искажается на поверхности магнитной жидкости. Намагниченность жидкости предполагается зависящей от величины магнитного поля по формуле Ланжевена. Изучено влияние величины угла смачивания на критическое значение тока, выше которого магнитожидкостная перемычка не существует. Исследованы возможности распада этой перемычки и возникновения капли на проводнике при токах меньших критического значения. Также вычислены зависимости объема капли от толщины капли при постоянном токе. На основе вида этих зависимостей показано, что для достаточно больших капель (при любом угле смачивания) могут наблюдаться и скачкообразные изменения толщины капли при определенных значениях тока, и гистерезис толщины капли при циклическом уменьшении и увеличении тока. В этих задачах объем между цилиндрами или капля на проводнике могут занимать любое положение вдоль вертикальной оси. Чтобы зафиксировать положение магнитной жидкости, можно поместить каплю на осесимметричную поверхность переменного сечения, по оси которой течет линейный ток.

Здесь рассмотрен частный случай формы поверхности, которая представляет собой две конические поверхности с разными углами раствора α_1 и α_2, имеющие общую ось и пересекающиеся по окружности радиуса проводника. При $\alpha_1 \neq 0°$, $\alpha_2 \neq 0°$, как и при $\alpha_1 = 0°$, $\alpha_2 = 0°$ (когда капля магнитной жидкости находится на линейном проводнике с током), показано, что для достаточно больших капель могут наблюдаться и скачкообразные изменения толщины капли, и гистерезис формы магнитной жидкости. Однако при $\alpha_1 \neq 0°$, $\alpha_2 \neq 0°$, когда капля отдалена от проводника с током с помощью конических поверхностей, эти скачкообразные и гистерезисные явления могут происходить только при больших объемах магнитной жидкости и при больших токах в проводнике, чем при $\alpha_1 = 0°$, $\alpha_2 = 0°$.

Исследуется конечный объем магнитной жидкости, который лежит на горизонтальной плоскости в поле вертикального проводника с током ($\alpha_1 = 0°$, $\alpha_2 = 90°$). Этот случай не является частным случаем задачи, описанной выше, так как при этих углах для фиксированного объема магнитной жидкости существует критическое значение тока, при превышении которого статической формы поверхности магнитной жидкости не существует.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-90000).

1. *Naletova V.A., Turkov V.A., Vinogradova A.S. A magnetic fluid bridge between coaxial cylinders with a line conductor // Physics Procedia. – 2010. – V. 9. –P. 68-73.*

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ МГД-ТЕХНИКИ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

И.В. Витковский

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

Стратегией развития атомной энергетики России предусматривается ввод в систему атомной энергетики реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов).

Наряду с развитием наземной ядерной энергетики в настоящее время ведется разработка программы создания нового поколения космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) с применением быстрых реакторов.

Другим стратегическим направлением будущей энергетики является термоядерная энергетика, базирующаяся на применении крупных плазменных установок типа «ТОКАМАК».

В быстрых и перспективных термоядерных реакторах теплоносителем (жидкометаллическим рабочим телом) является жидкий щелочной металл: натрий, сплав натрий-калий, литий; или свинец и его сплавы. Литий, как рабочее тело, весьма перспективен для различных ионно-плазменных установок, включая космические электрореактивные двигатели (ЭРД) для коррекции орбит летательных аппаратов.

Для повышения безопасности и надежности упомянутых установок и агрегатов, как правило, требуется бесконтактное воздействие на рабочее тело, достаточно просто реализуемое магнитогидродинамическими (МГД) — машинами (электромагнитными насосами (ЭМН) и МГД-дросселями.

Требование к МГД-технике наземного и космического базирования, включая ее внутриреакторное применение, выдвинуло на первый план следующие задачи:

– разработку оригинальных конструкций высоконадежных МГД-машин и устройств в диапазоне расходов рабочих тел от единиц кубических миллиметров до нескольких кубических метров в секунду (в том числе устройств, объединяющих в одной конструкции МГД-насос и дроссель, МГД-насосов для эксплуатации в режимах «пассивного дросселирования» и «ожидания», в которых гидравлические потери в обесточенном состоянии должны быть минимально возможными, а КПД в рабочем режиме максимальным), предназначенных для эксплуатации при воздействии высокой температуры, ионизирующего излучения, и, в то же время, стойких к воздействию вибрационных нагрузок, возникающих, в частности, в результате землетрясений;

– разработку принципиальных решений конструкций МГД-каналов и материалов для них, обеспечивающих, с одной стороны — требуемый расурс, а с другой – снижение эффекта дросселирования в жидкометаллических проточных трактах, например, в бланкете термоядерного реактора;

– выбор окружающей МГД–технику газовой среды, исследование и разработку материалов обмотки, и композиций из них, не содержащих и не образующих в процессе эксплуатации, из-за терморадиационного воздействия и диффузионных процессов, агрессивных, электропроводящих, ионизируемых элементов и материалов.

Решение отмеченных выше задач в настоящее время реализуется в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова с участием отечественных и зарубежных специалистов, предприятий и организаций.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ПЕРЕМЫЧКИ МЕЖДУ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ В ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Т.И. Волкова[1,2], В.А. Налетова[1], В.А. Турков[2]

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт механики МГУ, Москва, Россия*

В данной работе теоретически исследовано разрушение перемычки из магнитной жидкости между горизонтальными пластинами в магнитном поле линейного проводника с током, расположенного горизонтально над верхней пластиной. В [1] численно рассчитаны формы поверхности конечного объема магнитной жидкости без учета поверхностного натяжения среды. В работе [2] теоретически получена универсальная зависимость максимального расстояния между горизонтальными плоскостями, при котором возможно разрушение магнитожидкостной перемычки между ними, от тока в линейном проводнике без учета поверхностных сил. В [3] исследованы формы поверхности капиллярной магнитной жидкости между горизонтальными пластинами в поле линейного горизонтального проводника с током.

В работе решается задача о возможности разрушения магнитножидкостной перемычки заданного объема между горизонтальными плоскостями с учетом поверхностного натяжения. Магнитное поле создается горизонтальным, прямолинейным проводником с током, расположенным над верхней пластиной. Намагниченность магнитной жидкости описывается формулой Ланжевена для парамагнитного газа. В случае смачивания получены зависимости максимального расстояния между пластинами, при котором происходит разрушение магнитожидкостной перемычки заданного объема, от параметра, пропорционального току в проводнике. Эти зависимости качественно совпали с экспериментально измеренными кривыми в работе [4]. Показано, что при учете поверхностного натяжения среды кривые безразмерного максимального расстояния, вычисленные для нескольких значений объема магнитной жидкости, не совпадают друг с другом. Полученные результаты можно использовать для расчета объема магнитной жидкости, необходимого для создания магнитожидкостной перемычки при заданном токе и расстоянии между плоскостями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №12-01-90000).

1. *Налетова В.А., Волкова Т.И., Рекс А.Г., Турков В.А. Тяжелая магнитная жидкость между горизонтальными плоскостями в поле горизонтального проводника // Сб. IX Межд. научн. конф. «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», 24-26 июня 2009 г. – СПбГУ, 2009. – С. 360-364.*
2. *Волкова Т.И. Управление магнитожидкостной перемычкой между горизонтальными плоскостями с помощью линейного проводника с током // Сб. XVI Зимней школы по механике сплошных сред, 24-27 февраля 2009 г. – Пермь, 2009. – С. 96.*
3. *Виноградова А.С., Волкова Т.И. Статические формы поверхности магнитной жидкости в поле проводника с током // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2011. – № 4 (5). – С. 2066-2068.*
4. *Налетова В.А., Рекс А.Г., Савчук Е.Л., Тайнова А.А., Цвирко М.И. Устойчивость капли магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле // 13-я Межд. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Плес, 2008. – С. 269-274.*

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ-ТОКАМАКЕ

Л.Г. Генин[1], И.А. Мельников[1], Ю.П. Ивочкин[2], В.Г. Свиридов[1], Н.Г. Разуванов[2], Е.В. Свиридов[1]

[1]*НИУ МЭИ, Москва, Россия*
[2]*ОИВТ РАН, Москва, Россия*

Проекты жидкометаллических (ЖМ) модулей охлаждения бланкета термоядерных реакторов ITER, DEMO, а также перспективных гибридных реакторов — термоядерных источников нейтронов (ТИН) включают в себя участки вертикальных каналов, где течение ЖМ теплоносителя осуществляется в поперечном магнитном поле (МП).

Исследования магнитно-гидродинамического (МГД) теплообмена применительно к реактору-токамаку проводятся на уникальном ртутном МГД-стенде МЭИ-ОИВТ РАН. Подробные исследования, проведенные ранее при течении ртути в горизонтальной трубе в продольном или поперечном МП, а также в вертикальной трубе в продольном МП, обнаруживают сильное влияние термогравитационной конвекции (ТГК) на поля температуры и скорости, распределения коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) [1, 2]. Результат совместного воздействия ТГК и МП неоднозначен, существенно зависит от взаимной ориентации трубы и вектора индукции МП и может приводить к неожиданным эффектам.

Последние экспериментальные исследования, выполненные при опускном течении ртути в трубе в поперечном МП, показали, что и в этой конфигурации течения под влиянием встречной ТГК также наблюдаются сильные МГД-эффекты.

Применялись зондовые методы измерений с использованием микротермопар в диапазоне режимных параметров $Re = 5000 \div 100000$; $Ha = 0 \div 500$; $Gr_q = 0 \div 1.3 \cdot 10^8$. Измерены поля осредненной температуры и профили скорости, распределения локальных и средних чисел Нуссельта, характеристики пульсаций температуры.

Поперечное МП подавляет турбулентность и повышает критическое число Рейнольдса, вызывает эффект Гартмана. Вследствие этого, числа Нуссельта в среднем снижаются с турбулентных значений $Nu_т$ до значения $Nu_{л,Ha} = 7$. При этом распределение температуры стенки Θ_c по периметру сечения трубы в поперечном МП становится существенно неоднородным.

В некоторых режимах с достаточно большими соотношениями Грасгофа и Рейнольдса (Gr_q / Re^2) в поперечном МП наблюдается появление низкочастотных пульсаций температуры, интенсивность которых в несколько раз превышает уровень температурных пульсаций в отсутствие МП. Проникая в стенку теплообменника, эти пульсации вызывают значительные переменные термические напряжения в стенке, что может привести к ее усталостному разрушению.

Обнаруженные эффекты необходимо учитывать в конструкторских расчетах теплообменников в токамаках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

1. *Ковалев С.И., Муравьев Е.В., Свиридов В.Г., Новые аспекты теплообмена при течении жидкого металла в магнитном поле термоядерного реактора // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 1990. – Вып. 1. – С. 32-37.*
2. *Генин Л.Г., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена жидких металлов в магнитных полях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2003. – Вып. 4. – С. 35-44.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ В СВЯЗАННЫХ КАНАЛАХ

А.Ф. Глухов, В.А. Демин, И.А. Мальгачева

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Обсуждаются результаты сравнительных экспериментов по конвекции магнитных жидкостей и молекулярных жидких бинарных смесей. Описанные в [1] специфические низкочастотные конвективные колебания феррожидкости в связанных вертикальных каналах оказались удивительным образом качественно схожи с колебаниями бинарных смесей. В тех и других средах вблизи порога неустойчивости равновесия наблюдается периодическая смена направления течения в каналах. Природа конвективных колебаний молекулярных бинарных смесей в вертикальных каналах установлена, построена теория явления, выполнены численные и аналитические расчеты и результаты описаны в серии работ [2, 3]. Выяснилось, что определяющую роль в этих колебаниях играет положительная термодиффузия тяжелой примеси, например, сульфата натрия в воде.

Для выяснения природы конвективных колебаний в феррожидкости были предприняты дополнительные сравнительные опыты с магнитными жидкостями и растворами сульфата натрия в воде. Особое внимание уделялось зависимости периода колебаний от надкритичности. Экспериментальная установка состояла из прямоугольного латунного стержня, вдоль которого были выточены два параллельных канала квадратного сечения шириной 3.2 мм и высотой 50 мм. Каналы сверху и снизу соединялись друг с другом двумя перемычками того же профиля. Вертикальный градиент температуры создавался при помощи электрического нагревателя внизу и обдуваемого радиатора вверху. При достижении критических условий подогрева возникало конвективное течение среды: в одном канале восходящий поток, а в другом — нисходящий. Интенсивность течения определялась по разности температур между восходящим и нисходящим потоками при помощи дифференциальной медь-константановой термопары из проводов диаметром 0.1 мм. В качестве рабочих использовались керосин, дизельное топливо, магнитные жидкости на основе керосина с 4 % и 12 % содержанием магнетитовых частиц размером порядка 10 нм и 4% и 10% растворы сульфата натрия в воде. Опыты с керосином рассматривались как предельный случай жидкости без феррочастиц.

Выяснилось, что периодическая смена направления течения происходит не только в феррожидкости, но и в керосине и дизельном топливе. Причем результаты измерения периода колебаний в зависимости от надкритичности для всех концентраций магнитных жидкостей и керосина группируются вокруг одной линии. Период колебаний растворов сульфата натрия меньше и точки группируются около другой линии с меньшим наклоном.

Исходя из предположения о том, что период колебаний определяется временем темодиффузиононого разделения смеси поперек канала, экспериментальные периоды были нормированы на соответствующее характерное диффузионное время. В результате все точки оказались сгруппированными вокруг одной прямой. В качестве коэффициента диффузии для компонентов керосина выбрано подгоночное значение $3.5\cdot10^{-6}$ см^2/с. Для сравнения, коэффициент диффузии дифенила $C_{12}H_{13}$ в н-бутиловом спирте равен $6.5\cdot10^{-6}$ см^2/с. Попытка использовать для нормировки коэффициент диффузии магнитных частиц немедленно разрушает совпадение результатов, т.к. диффузия феррочастиц на два порядка слабее.

Описанные экспериментальные результаты дают основания для построения уравнений конвекции магнитной жидкости как трехкомпонентной среды, состоящей из бинарного носителя наполненного магнитными частицами.

1. *Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. // Изв. РАН. МЖГ. – 2010. – № 5. – С. 41-48.*
2. *Глухов А.Ф., Демин В.А. Путин Г.Ф. // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34., Вып. 17. – С. 45-51.*
3. *Глухов А.Ф., Демин В.А. // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Физика. – 2009. – Вып. 1(27). – С. 2-16.*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ ФЕРРОЖИДКОСТИ В СВЯЗАННЫХ КАНАЛАХ

А.Ф. Глухов, В.А. Демин, Е.А. Попов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Обширная область исследований, направленных на изучение феррожидкостей (ФЖ), связана с их поразительной чувствительностью по отношению к воздействию внешних магнитных полей (МП). С помощью МП можно изменять форму свободной поверхности ФЖ, регулировать скорость ее течения, управлять плавучестью тел, погруженных в нее и т.д. Размеры феррочастиц могут варьироваться в широком диапазоне, причем более высокую степень текучести магнитные жидкости (МЖ) приобретают, когда частицы измельчаются до размеров 5-10 нм. В роли несущей жидкости могут выступать разные среды, но наиболее распространенной является керосин. Взвесь представляет собой фактически однодоменные магнетитовые частицы, которые обладают магнитными моментами. Частицы покрываются поверхностно-активным веществом, которое предотвращает их слипание и препятствует выпадению в осадок. Большие значения магнитных моментов при относительно малых размерах частиц и возможность длительного нахождения во взвешенном состоянии в жидкости-носителе приводят к тому, что ФЖ ведет себя во внешнем магнитном поле как парамагнетик с аномально большой магнитной восприимчивостью. ФЖ активно изучаются уже более полувека, несмотря на это, природа многих явлений, связанных с ними, до сих пор остается невыясненной. Причина заключается в том, что типичная МЖ — это сложная среда, состоящая из разнородных компонентов. Наличие относительно тяжелых феррочастиц свидетельствует, что МЖ является коллоидной магниточувствительной средой. Однако, несущая жидкость (керосин) сама является многокомпонентной молекулярной смесью. Теоретическое описание молекулярных растворов и коллоидных сред основывается на разных подходах. При изучении неоднородно нагретых молекулярных смесей в первую очередь учитываются такие явления как диффузия и термодиффузия. Поведение коллоидов определяется другими эффектами и более разнообразным набором характерных времен, каждое из которых вследствие особой чувствительности к размеру частиц может совпадать, а может и на многие порядки отличаться от характерных времен в молекулярных смесях. МП оказывает на движение ФЖ колоссальное влияние, но в его отсутствие на передний план выступают другие более тонкие эффекты, не связанные с воздействием внешних полей. Сложная, обусловленная наличием внутреннего гиромагнетизма реология ФЖ должна наиболее ярко проявляться при ее движении по узким каналам. В [1] было проведено исследование тепловой конвекции молекулярных растворов в длинных связанных каналах с границами высокой теплопроводности. Установлена ключевая роль термодиффузии при формировании специфических перебросовых режимов в области малых надкритичностей. Эксперименты [2] выявили подобие конвективных явлений в молекулярных бинарных смесях с положительной термодиффузией и феррожидкостях на основе керосина. Объяснения, почему в МЖ, так же как в молекулярных смесях, формируются специфические перебросовые колебания, дано не было. Период перебросов в МЖ заметно превышает таковой в молекулярных растворах и не зависит от концентрации частиц, а форма колебаний более П-образная. Предложенная теоретическая модель ФЖ, как коллоидного магнито-чувствительного раствора со сложным носителем, позволяет объяснить результаты опытов. Неоднородно нагретый керосин, как сложная среда разделяется вследствие термодиффузии, а феррочастицы за счет слабой седиментации и внутреннего гиромагнетизма привносят свою специфику в поведение ФЖ в виде увеличения периода перебросовых колебаний, а также других не менее существенных эффектов, фиксируемых экспериментально.

1. *Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф. // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34., Вып. 17. – С. 45-51.*
2. *Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. // Изв. РАН. МЖГ. – 2010. – № 5. – С. 41-48.*

ON PROBLEM OF LIQUID METALS MIXING IN MHD DEVICES

E. Golbraikh[1,2], A. Kapusta[2], B. Mikhailovich[2,3]

[1]*Physics Department,*
[2]*Center for MHD Studies,*
[3]*Mechanical Engineering Department*
Ben-Gurion University of the Negev, POBox 653, Beer-Sheva 84105, Israel

At present, electromagnetic stirring (EMS) of liquid metals and alloys is widely used at most stages of metallurgical products manufacture in arc furnaces, ladle-furnace, continuous casting machines, etc.

In all the cases, an immediate purpose of EMS is to homogenize the temperature and chemical composition of the melt in metallurgical facilities or in the liquid core of a continuous ingot. The parameters homogenization in the liquid core of an ingot reduces the thickness of temperature and concentration boundary layers, which increases the heat flow and decreases the probability of columnar structure formation. EMS intensity is a key word of the scientific, patent and advertising printed output related to EMS use in metallurgical technology. As a rule, this term, which is not defined strictly enough, is connected either with an intention to increase the Reynolds number determined by the mean velocity of the main turbulent melt component in the flow region, or with an intention to increase the hydraulic efficiency of EMS facility.

Specialists developing stiring facilities for chemical technology and later — physicists studying the processes of heat and mass transfer in a permanent magnetic field, developed a method of quantitative evaluation of stirring intensity by final results of the measurements of the intensity of transfer processes.

If the stirring occurs in a turbulent mode ($\mathrm{Re} \geq 10^5$), the process of heat or mass transfer is described by an equation of the following form $Nu = C \cdot \mathrm{Re}^{\alpha_1} \mathrm{Pr}^{\alpha_2}$, where Nu, Re and Pr are the Nusselt, Reynolds and Prandtl numbers.

If the liquid has a free surface $Nu = C \cdot \mathrm{Re}^{\alpha_1} \mathrm{Pr}^{\alpha_2} Fr^{\alpha_3}$, where Fr is the Froud parameter.

In case of EMS under the action of a rotating magnetic field (RMF), the Reynolds number of the rotating flow is not an independent parameter, being a function of the Hartmann number and in this case $Nu = f(Ha, \mathrm{Re}, \varepsilon, \mathrm{Pr}, Fr)$. Additional parameters characterizing a rotating turbulent flow were determined in [1, 2]. These parameters $\gamma = \mathbf{v} \cdot \mathrm{rot}\mathbf{v} / \mathbf{v}^2$ and $\alpha \propto He$ are determined by the mean flow helicity and by its turbulence helicity. In this case, we introduce an additional dimensionless parameter $K = \omega / (\alpha\gamma)$ characterizing the ratio of the convective and turbulent vortices sizes and $Nu = f(Ha, \mathrm{Re}, \varepsilon, \mathrm{Pr}, Fr, K)$ .Thus, to study the process of stirring under the action of RMF, we should find a connection between its mean and turbulent characteristics.

In the present work, the problem of molten metals and alloys stirring by a rotating magnetic field is discussed using experimental data and the semi-empirical "external" friction model. Characteristic flow parameters (mean and turbulent ones) determining the stirring quality arediscusses.

1. *Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B. Rotating turbulent MHD flows: semi-empirical model flows // Magnetohydrodynamics. –2007. – V. 43, N. 1. – P. 35-44.*
2. *Golbraikh E., Kapusta A., Tilman B. Helical properties of MHD flows arising under the action of rotating magnetic fields // Magnetohydrodynamics. – 2010. – V. 46, N. 1. – P. 79-83.*

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ В ИДЕАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

С.В. Головин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Даётся обзор точных решений уравнений идеальной магнитной гидродинамики, полученный автором на основе теоретико-группового подхода и геометрических методов. Выделяются следующие классы решений:

- Вихрь Овсянникова: пространственное течение от сферического источника с плоскими траекториями частиц и плоскими магнитными линиями.
- Течения с постоянным полным давлением: полное аналитическое описание стационарных течений и примеры нестационарных течений с нетривиальными магнитными поверхностями.
- Отдельные примеры решений с линейным по части переменных полем скорости.

Обсуждается геометрическая картина описываемых течений, возникновение особенностей, описание течений с сильными разрывами на неплоских поверхностях, возможности для варьирования течений с использованием имеющегося произвола в решениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президентской программы поддержки ведущих научных школ (НШ-6706.2012.1) и молодых докторов наук (МД-168.2011.1).

МГД-НАСОС БЕГУЩЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ЖИДКОГО МАГНИЯ

С.А. Денисов, В.М. Долгих, И.В. Колесниченко, Р.И. Халилов, С.Ю. Хрипченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Среди многих конструкций индукционных МГД машин наибольшее распространение получили машины с линейным плоским и цилиндрическим каналами. Это линейные индукционные электромагнитные насосы с бегущим магнитным полем, образуемым системой трехфазного переменного тока. Принцип работы такого насоса заключается в следующем: трехфазная обмотка, расположенная в пазах индуктора, создает бегущее магнитное поле, индуцирующее в слое жидкого металла электрические токи. Взаимодействие этих токов с результирующим магнитным полем приводит к появлению электромагнитных сил, действующих вдоль движения магнитного поля.

Использование насосов бегущего поля в металлургическом производстве при литье цветных металлов имеет некоторые ограничения связанные, главным образом, с конструктивной особенностью этих насосов. Действительно, электрические обмотки таких насосов при традиционной схеме располагаются в непосредственной близости от сильно разогретого канала, что приводит к их перегреву и быстрому выходу из строя. Так, например, в насосе бегущего поля, применяемом при литье крупногабаритных магниевых слитков, приходится часто менять электрические обмотки, так как вследствие тяжелого температурного режима они быстро выходят из строя. С другой стороны насосы, бегущего поля имеют простой прямолинейный канал, который легко и быстро изготавливать из металлической трубы (как это делается для жидкого магния и подобных ему металлов), что является очевидным достоинством таких насосов.

Отличительной особенностью данной конструкции от обычных линейных насосов является наличие С-образных индукторов для генерации бегущей электромагнитной волны, что позволяет разместить уязвимые катушки дальше от горячего канала с жидким металлом. Тем не менее, катушки в такой конструкции испытывают тепловое воздействие, которое вызвано нагревом от горячего канала и паразитными индукционными токами (от магнитных полей рассеяния) в сердечниках индукторов. Поэтому для уменьшения этих вредных влияний необходимы исследования температурных, гидродинамических и электромагнитных полей в элементах конструкции МГД-насоса.

В докладе рассматривается МГД-насос бегущего магнитного поля, состоящий из шести С-образных индукторов, расположенных друг за другом. В их зазоры устанавливается плоский канал, по которому перекачивается жидкий металл. Сердечники питаются от трехфазной сети переменного тока и подключены таким образом, чтобы организовать бегущую волну. Электрические обмотки в таком насосе конструктивно отдалены от разогретого канала с жидким металлом. Канал в насосе может быстро извлекаться и возвращаться в насос. В работе были проведены экспериментальные и численные исследования температурных режимов насоса, рассчитаны магнитные поля в ферромагнитных сердечниках индуктора насоса. Был выполнен численный расчет объемных электромагнитных сил, действующих на проводящий канал. На галлиевом контуре получена напорно-расходная характеристика насоса, проведены испытания на жидком магнии.

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД-НАСОСА «ПУШ-ПУЛ» ДЛЯ ЖИДКОГО МАГНИЯ

С.А. Денисов, В.М. Долгих, И.В. Колесниченко, Р.И. Халилов, С.Ю. Хрипченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Насос типа «Пуш-пул» — это безобмоточный насос наружного расположения и состоит из двух секций однотипных последовательно соединённых МГД насосов: тянущего и толкающего насосов. Насос работает на том же физическом принципе, что и насос Кабакова [1]: насосный эффект возникает в результате взаимодействия тока в плоском канале с собственным магнитным полем, которое усиливается ферромагнитным П-образным сердечником. При этом возникают объёмные силы, втягивающие металл в канал. Сердечники ориентированы относительно канала таким образом, что давления, развиваемое каждой секцией, суммируется.

В отличие от насоса Кабакова насос типа «Пуш-пул» не имеет шин токоподвода, что упрощает конструкцию и повышает её надёжность. Ток в насосе наводится индукционным способом от специального трансформатора, где канал насоса является вторичной обмоткой трансформатора. Производительность насоса зависит от тока в канале, который может достигать до 6 кА и более, и её можно менять, регулируя напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Были проведены стендовые испытания насоса на галлиевом сплаве и заводские испытания на жидком магнии. Получена напорно-расходная характеристика при рабочих токах в канале 2, 3 и 4 кА. Физическая модель насоса имела ферромагнитные сердечники с немагнитным зазором 18мм, внешнюю толщину канала под сердечниками 16 мм, внутреннюю толщину канала 8мм. Канал изготовлен из немагнитной нержавеющей трубы диаметром 42 мм. Насос развивал расход до 8 тонн жидкого магния в час при подъёме металла на высоту до 1 метра. При нулевом расходе (стопорный режим) насос способен поднять магний на высоту до 6 метров (давление около 1 атмосферы). Полученные результаты имеют хорошее совпадение с расчётами.

Испытания и расчёты показали, что насос развивает давление и расход, удовлетворяющие потребностям литейного производства. Его можно успешно применять в установках подачи магния на литейный конвейер и для литья крупногабаритных слитков. При этом наблюдается некоторое улучшение качества разливаемого металла. Кроме того, эксплуатация в условиях реального производства показала, что насос надёжен и лёгок в обслуживании.

1. *Кабаков Г.И. Электромагнитный насос. Патент РФ №2052672, 1992.*

МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Ю.И. Диканский, Д.В. Гладких, А.А. Золотухин

Ставропольский государственный университет, Ставрополь, Россия

Возможность возникновения дальнего магнитного порядка в системе коллоидных однодоменных частиц ранее рассматривалась во многих работах, однако к настоящему времени этот вопрос еще остается недостаточно ясным. Ранее [1] нами сообщалось об обнаружении хорошо развитой системы намагниченных агрегатов, возникшей в магнитной жидкости (МЖ) на основе керосина при длительном ее хранении. В работе [2] приведена методика и определены условия их получения. В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования магнитных жидкостей, содержащих такие агрегаты, а также исходных магнитных жидкостей, в которых они возникают.

Установлено, что начальный участок кривых намагничивания образцов с намагниченными агрегатами имеет перегиб в области небольших значений напряженности поля, чего никогда не наблюдалось ранее для однородных магнитных жидкостей. При этом он имеет большую крутизну, чем начальный участок кривой намагничивания магнитной жидкости с таким же содержанием магнитной фазы, но однородной по составу. Наличие перегиба на кривой намагничивания указывает на то, что зависимость средней магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля имеет максимум в области перегиба. Такой же характер, как показали измерения в переменных полях при дополнительном воздействии постоянным полем, имеет и полевая зависимость действительной части магнитной восприимчивости, которая может быть идентифицирована как дифференциальная восприимчивость.

Наличие максимумов полевых зависимостей восприимчивости обусловлено вкладом ориентационного вращения намагниченных агрегатов в общую намагниченность исследуемых сред. Действительно, под воздействием поля агрегаты начинают ориентироваться вдоль направления поля даже при небольших значениях его напряженности и объединяются в нитевидные структуры при дальнейшем его увеличении. Эти процессы и приводят к первоначальному увеличению магнитной восприимчивости. При достаточно сильных полях, когда все вытянутые агрегаты выстроятся вдоль поля, увеличение намагниченности системы обеспечивается за счет ориентации дисперсных частиц, составляющих агрегаты и находящихся в омывающей их слабоконцентрированной фазе. В этом диапазоне напряженности поля магнитная восприимчивость, вследствие начавшегося насыщения намагниченности системы начинает уменьшаться.

Таким образом, можно заключить, что в магнитных коллоидах возможно образование агрегатов, имеющих отличный от нуля магнитный момент. Возникновение таких агрегатов в магнитной жидкости может быть объяснено с позиций теории медленной коагуляции, при которой происходит ближняя фиксация дисперсных частиц на расстояниях, обеспечивающих эффективную корреляцию их моментов. При этом в магнитной жидкости происходит образование коротких цепочечных структур из связанных между собой дипольных частиц. В дальнейшем, из таких цепочечных структур и происходит формирование более крупных агрегатов. Можно заключить, что необходимым условием образования агрегатов, имеющих отличный от нуля магнитный момент, является наличие жесткой связи магнитного момента дисперсной частицы с ее матрицей. Подтверждением этого может служить и тот факт, что образование таких агрегатов наблюдается в магнитных жидкостях с относительно большим размером частиц. При достаточно высокой концентрации намагниченных агрегатов, они оказывают существенное влияние на магнитные свойства коллоидов.

1. *Диканский Ю.И., Балабанов К.А., Борисенко О.В., Киселев В.В. Магнитное упорядочение в магнитных жидкостях, содержащих квазитвердые агрегаты // Магнитная гидродинамика. – 1997. – Т. 33, № 2. – С. 243-245.*
2. *Диканский Ю.И., Вегера Ж.Г., Закинян Р.Г., Нечаева О.А., Гладких Д.В. О возможности структурного и магнитного упорядочения в магнитных коллоидах // Коллоидный журнал. – 2005. – Т. 67, № 2. – С. 1-6.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СПИРАЛЬНОГО БЕЗОБМОТОЧНОГО МГД-НАСОСА

В.М. Долгих, С.А. Денисов, Р.И. Халилов, С.Ю. Хрипченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Всё возрастающее применение магнитогидродинамических (МГД) насосов в современном производстве предъявляет к этим устройствам высокие требования, такие как малые вес и габариты, простота конструкции, надёжность, удешевление производства и т.д. Представляемый в докладе спиральный МГД насос предназначен для перекачивания легкоплавких металлов и сплавов.

Канал насоса выполнен из стальной нержавеющей трубы, свернутой в плоскую спираль Архимеда, соседние витки которой в необходимых местах электрически соединены между собой для обеспечения протекания на этих участках канала радиальных составляющих электрического тока.

Отличительной особенностью данного насоса является отсутствие обмоток для создания магнитного поля в канале. Для этой цели используется собственное магнитное поле тока канала, усиленное в канале с помощью двух ферромагнитных П–образных сердечников, охватывающих электрически соединенные витки канала.

В докладе представлены экспериментальные P-Q –характеристики модели спирального МГД насоса в зависимости от 3-х способов создания тока в канале. В качестве рабочего тела был использован галлиевый сплав.

Канал экспериментальной модели спирального МГД насоса выполнен из трубы с внутренним диаметром 10мм, толщиной стенки 1мм, свёрнутой в спираль из 4-х витков, и снабжён двумя ферромагнитными сердечниками с немагнитным зазором 16 мм. При наиболее простом способе создания тока в канале, равном 3000А, модель развила давление 113 кПа (при нулевом расходе), и расход 119 куб. см/сек при давлении 12 кПа.

МНОГОЧАСТИЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ОРИЕНТАЦИЮ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ПАРЫ ФЕРРОЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Е.А. Елфимова, В.А. Ефимова

Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

Парная функция распределения в результате классического вириального разложения представляется в виде ряда по степеням объемной концентрации. Коэффициенты ряда являются результатом усреднения по всевозможным ориентациям магнитных моментов и положениям феррочастиц, и зависят только от расстояния между парой случайно выбранных частиц при условии отсутствия внешнего магнитного поля. Таким образом, парная функция распределения характеризует вероятности расположения случайной пары феррочастиц на заданном расстоянии. Цель данной работы — исследовать наиболее вероятное расположение магнитных моментов случайной пары феррочастиц относительно друг друга на заданном расстоянии.

Для решения поставленной задачи использовалась методика диаграммного представления вириальных коэффициентов: второй вириальный коэффициент соответствует комплексу двухчастичных диаграмм, третий — трехчастичным диаграммам и т.д. В первом приближении, при учете только двухчастичных диаграмм, получился прогнозируемый результат: с энергетической точки зрения наиболее выгодным является расположение магнитных моментов типа «голова-хвост». Второе приближение учитывает воздействие третей частицы на исследуемую пару. Тут так же получился результат, что наиболее выгодное расположение — «голова-хвост».

Интерес представляет тот факт, что на расстояниях между частицами близким к одному диаметру этих частиц, величина парной функции распределения, а соответственно и вероятность того, что магнитные моменты данной пары будут расположены по типу «голова-хвост», увеличивается с увеличением объемной концентрации частиц в магнитной жидкости.

С увеличением расстояния в пределах от одного до двух диаметров, наблюдается точка пересечения графиков парной функции распределения, построенных для различных концентраций, при переходе через которую картина изменяется на диаметрально противоположную ситуацию: величина парной функции распределения начинает уменьшаться с увеличением объемной концентрации.

При рассмотрении расстояний от двух диаметров, величина парной функции распределения уменьшается с увеличением объемной концентрации частиц. Причем разница между значениями существенно увеличивается при увеличении параметра диполь-дипольного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.609.2011).

НАЧАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ: ТЕОРИЯ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е.А. Елфимова, Е.В. Турышева

Институт математики и компьютерных наук,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

Принципиальной особенностью феррожидкостей является определяющая роль межчастичных взаимодействий магнитной природы. Для частиц, рассматриваемых как однородно намагниченные сферы, это взаимодействие описывается парным диполь-дипольным потенциалом, который имеет нецентральный характер, т.е. зависит не только от расстояния между феррочастицами, но и от взаимной ориентации их магнитных моментов. Магнито-дипольные силы в феррожидкостях приводят к весьма большим, в сравнении с другими жидкостями, значениям магнитной восприимчивости, которая для промышленных систем составляет 1-10, а для высоко концентрированных лабораторных образцов достигает рекордных значений ~ 60-80 при комнатных температурах (например, [1]). Ни одна из известных теоретических моделей, на сегодняшний день, не способна адекватно описать и объяснить такой высокий магнитный отклик лабораторных образцов.

Цель настоящей работы — комплексное исследование (теория и компьютерное моделирование) начальной магнитной восприимчивости концентрированных феррожидкостей, с учетом многочастичных корреляций как магнитной, так и немагнитной природы.

Для определения магнитных свойств концентрированных феррожидкостей использован метод, основанный на связи магнитных характеристик системы феррочастиц с парной корреляционной функцией. Такой подход позволяет построить разложение начальной магнитной восприимчивости в виде двойного ряда по степеням концентрации и интенсивности межчастичного диполь-дипольного взаимодействия. Особое внимание уделено многочастичным корреляциям, которые играют решающую роль в концентрированных системах. Исследование проводилось на основе двух модельных систем, с разными короткодействующими потенциалами межчастичного взаимодействия: твердые сферы и прямоугольная потенциальная яма. Последний потенциал является самым простым приближением межчастичного Ван-дер-ваальсового притяжения, и его учет оказался существенным в описании магнитных свойств высококонцентрированных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.609.2011).

1. *Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluid // J. Chem. Phys. – 2004 – V. 121. – P. 5455-5467.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО СОСТАВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Ю.А. Епифанов, Е.А. Елфимова

Институт математики и компьютерных наук,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Работа посвящена теоретическому исследованию внутренней структуры магнитных жидкостей в сильном гравитационном поле. Основываясь на экспериментальных данных по магнитной восприимчивости, теоретически были определены концентрационный профиль и дисперсионный состав магнитной жидкости. Для построения теории магнитная жидкость моделировалась бидисперсной системой дипольных твердых сфер. Частицы каждой фракции имели одинаковый диаметр и величину магнитного момента. Каждая феррочастица характеризовалась радиус-вектором положения её центра масс, и вектором, определяющим ориентацию её магнитного момента. Парные взаимодействия между частицами описывались суммой потенциалов твердых сфер и диполь-дипольного взаимодействия. В условиях термодинамического равновесия, в отсутствии внешнего магнитного поля из условия равенства гравитационного и диффузионного потоков определялся профиль концентрации феррочастиц в рассматриваемом объеме. Диффузионный поток зависел как от концентрации феррочастиц так и от интенсивности диполь-дипольного взаимодействия. Стерические взаимодействия описывались с помощью аппроксимации Карнагана-Старлинга для дипольных твердых сфер. Для изучения диполь-дипольных межчастичных взаимодействий, свободная энергия дипольных твердых сфер представлялась в виде вириального ряда до квадратичного слагаемого по концентрации [1]. Предполагалось, что частицы каждой фракции взаимодействуют как между собой, так и с частицами другой фракции. Используя известную зависимость между концентрацией и магнитной восприимчивостью, был построен профиль магнитной восприимчивости, который сопоставлялся с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.609.2011).

1. *Pshenichnikov A.F., Elfimova E.A., Ivanov A.O. Magnetophoresis, sedimentation, and diffusion of particles in concentrated magnetic fluids // J. Chem. Phys. – 2011. – V. 134, N. 18. – 184508.*

ПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПЕНСИРОВАННОМ ФЕРРОНЕМАТИКЕ

А.Н. Захлевных, Д.А. Петров

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

На основе континуальной теории [1] исследованы пороговые явления, возникающие под влиянием магнитного поля в высокодисперсной суспензии однодоменных иглообразных феррочастиц в нематическом жидком кристалле — ферронематике. Ферронематик предполагался компенсированным, т.е. в отсутствие магнитного поля в нем имеются равные доли примесных феррочастиц с магнитными моментами, направленными параллельно и антипараллельно директору.

Рассмотрен слой ферронематика между двумя параллельными пластинами. Сцепление директора с границами слоя предполагалось планарным и жестким, а с феррочастицами планарным и мягким. Постоянное магнитное поле прикладывалось поперек слоя, перпендикулярно оси легкого ориентирования, лежащей в плоскости слоя. В этом случае возникающая под действием внешнего поля деформация ориентационной и магнитной структуры отвечает комбинациям поперечного и продольного изгиба.

Свободная энергия ферронематика представляет собой функционал относительно директора, намагниченности и концентрации магнитной примеси, варьированием которого получена система интегральных уравнений для углов отклонения директора и намагниченности от оси легкого ориентирования и пространственного распределения двух сортов примесных феррочастиц, направленных параллельно и антипараллельно директору. Эта система решалась численно, а в предельных случаях — аналитически. Установлено, что под действием магнитного поля в системе пороговым образом появляются пространственные искажения полей директора и намагниченности. Аналитически найдены зависимости пороговых полей от материальных параметров системы. Исследованы предельные случаи сильного и слабого сцепления жидкого кристалла с поверхностью феррочастиц. Обнаружено, что уменьшение энергии сцепления директора с поверхностью феррочастиц приводит к немонотонному поведению угла отклонения директора и намагниченности от оси легкого ориентирования как функций напряженности магнитного поля.

Исследованы пространственные искажения ориентационной структуры директора и намагниченности, распределение магнитной примеси и фазовая задержка проходящего через образец света как функции приложенного магнитного поля и материальных параметров.

Выяснено, что определяющий вклад в появление ориентационных и магнитных искажений под действием магнитного поля вносят сегрегационные эффекты — накопление примесных частиц в тех областях слоя ферронематика, где минимальна сумма их энергии в магнитном поле и ориентационной энергии в жидкокристаллической матрице. Показано, что происходит перераспределение примеси между подсистемами феррочастиц: выше порогового поля концентрация частиц с магнитными моментами, ориентированными в направлении директора, растет в середине слоя ферронематика, в то время как концентрация частиц с магнитными моментами ориентированными антипараллельно директору, уменьшается по всему слою. Эффект сегрегации приводит к тому, что ферронематик пороговым образом перестает быть компенсированным и намагничивается в направлении поля.

Обнаружено немонотонное поведение поперечной намагниченности и концентрации частиц с магнитными моментами, ориентированными в направлении директора, с ростом напряженности магнитного поля.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-96030).

1. *Brochard F, de Gennes P.G. Theory of magnetic suspensions in liquid crystals // J. Phys. (France) – 1970. – V. 31. – P. 691.*

ВОЗВРАТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ТРИКРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОНЕМАТИКАХ

А.Н. Захлевных, Д.В. Макаров

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Мягкие конденсированные среды привлекают к себе внимание исследователей благодаря разнообразию наблюдаемых в них физических эффектов, которые обусловлены их сложностью и высокой чувствительностью к внешним условиям. Одним из таких материалов является ферронематик (ФН) — низкоконцентрированная суспензия магнитных частиц
в нематическом жидком кристалле (ЖК). ЖК-матрица обеспечивает текучесть и анизотропию физических свойств ФН, а внедренные в нее феррочастицы обусловливают сильный магнитный отклик суспензии. Поскольку магнитные частицы не закреплены в ЖК-матрице, они имеют возможность пространственного перемещения, мигрируя в те области ФН, где сумма их магнитной и ориентационной энергий в ЖК-матрице минимальна. Этот эффект получил название эффекта сегрегации. Он и обусловливает трикритическое поведение ориентационных переходов в ферронематиках. В отличие от чистых ЖК за счет сцепления магнитных частиц с ЖК-матрицей магнитное поле влияет как на ориентацию магнитных частиц (дипольный магнитный механизм), так и на ЖК подсистему (квадрупольный магнитный механизм). Наличие электрического поля, способного напрямую влиять только на ЖК-матрицу, дает еще один механизм влияния — квадрупольный электрический. Оба поля способны индуцировать ориентационные переходы Фредерикса в слое ФН независимо, однако, поскольку отклик суспензии на эти поля различен, то конкуренция между ними приводит к новым ориентационным эффектам в ферронематиках.

Нами теоретически изучены индуцированные совместным действием электрического и магнитного полей ориентационные переходы в ферронематиках. Рассмотрен плоский слой ФН, ортогонально плоскости которого приложены сонаправленные электрическое и магнитное поля. На границах слоя заданы условия жесткого планарного сцепления директора, а на поверхности магнитных частиц сцепление с директором предполагалось мягким и гомеотропным. Минимизацией свободной энергии ФН получены уравнения для директора, намагниченности и концентрации дисперсной фазы. Произведен численный расчет углов поворота директора и намагниченности для различных значений напряженностей полей и материальных параметров ФН. Показано, что в некотором диапазоне значений напряженности электрического поля включение магнитного поля индуцирует последовательность возвратных ориентационных переходов в ферронематике: неоднородная фаза — однородная фаза — неоднородная фаза. Это обусловлено взаимодействием между дипольным (ферромагнитным) и квадрупольными (диэлектрическим и диамагнитным) механизмами влияния полей на ФН. Построено разложение Ландау свободной энергии ферронематика вблизи ориентационных переходов. Показано, что возвратные переходы могут быть переходами как первого рода, так и второго, т.е. обнаруживают трикритическое поведение. Найдены аналитические выражения для трикритических значений сегрегационного параметра, при которых происходит смена типа перехода. Установлено, что электрическое поле может изменить тип магнитного перехода Фредерикса в ФН только от первого рода ко второму, но не наоборот. Показано, что возвратный переход в ФН не может быть вызван электрическим полем при фиксированном значении напряженности магнитного поля, так как критическое поле для электрического перехода Фредерикса является однозначной функцией магнитного поля. Магнитное поле может изменить тип этого перехода только от второго рода к первому. Получены концентрационное и ориентационное распределения магнитных частиц в слое. Показана немонотонность поведения порогового электрического поля для равновесного перехода Фредерикса в однородном магнитном поле.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-96030).

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В ФЕРРОНЕМАТИКЕ: ТЕОРИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЯ

А.Н. Захлевных[1], Ю.Л. Райхер[2], В.И. Степанов[2]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

Теория среднего поля Майера-Заупе, несмотря на свой зрелый возраст, остается основным инструментом для описания сложных жидкокристаллических систем, каждый раз заново подтверждая полезность физической феноменологии. Однако, в физике феррожидких кристаллов она до последнего времени фактически не использовалась. Главная причина заключается в том, что подавляющее большинство интересных и перспективных с точки зрения приложений идей предполагают, что ферронематический жидкий кристалл (ферронематик, ФН) уже находится в упорядоченном состоянии. В то же время, выше точки перехода ФН теряет свою специфику, и в неупорядоченном, то есть изотропном, состоянии оказывается практически неотличим от обычной магнитной жидкости.

Сегодня, когда синтез устойчивых ферронематиков перестал быть экзотическим событием (см., например, [1, 2]), растет интерес к углубленному пониманию поведения этих систем. В первую очередь, это касается их главной особенности: способности формировать упорядоченную фазу. Действительно, сама природа ФН — суспензий ферромагнитных наночастиц в жидкокристаллических матрицах — предполагает, что магнитное поле должно изменять параметры перехода. Качественные соображения показывают, что в двухкомпонентной среде, какой является ФН, имеется два главных механизма сдвига точки перехода. Первый эффект связан только с наличием твердого наполнителя (безразлично, магнитного или нет), Из-за этого (*i*) количество жидкокристаллического (мезоморфного) вещества в единице объема образца уменьшено по сравнению с однофазным жидким кристаллом и (*ii*) некоторая часть энергии мезоморфной матрицы тратится на «навязывание» создаваемой ориентации частицам примеси [3]. Второй эффект действует «в обратную сторону»: частицы магнитного наполнителя, ориентируясь под влиянием магнитного поля, сами ориентируют мезоморфную матрицу, в которой они взвешены. В зависимости от конкретных условий, любой из указанных факторов может как повышать, так и снижать точку перехода (температуру Кюри) в ферронематическое состояние.

Взаимодействие между ансамблем взвешенных частиц и жидкокристаллической матрицей играет в ФН ключевую роль. В простейшем случае эту ориентационную связь можно описать одним материальным параметром, куда входят: анизотропия поверхностного натяжения на границе частица / матрица, формфактор (геометрия) частиц и их концентрация [4]. Если энергия межкомпонентного взаимодействия задана, то теория среднего поля позволяет построить замкнутое описание перехода изотропное состояние — упорядоченная фаза в разбавленных ФН. Этот подход и реализован в настоящей работе. Значительно расширив и усовершенствовав среднеполевое описание, первая попытка которого была предпринята в [5], мы получили зависимость сдвига температуры фазового перехода в ФН от концентрации частиц и от напряженности приложенного однородного магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-02-96022 и №11-02-96000).

Авторы благодарны П. Копчанскому, привлекшему их внимание к интересной задаче.

1. *Tomašovičová N., Kopčanský P., Koneracká M., Tomčo L., Závišová V., Timko M., Éber N., Fodor-Csorba K., Tóth-Katona T., Vajda A., Jadzyn J. // J. Phys. Condens. Matter. – 2008. – V. 20. – 204123.*
2. *Buluy O., Nepijko S., Reshetnyak V., Ouskova E., Zadorozhnii V., Leonhardt A., Ritschel M., Schönhense G., Reznikov Yu. // Soft. Matter. – 2010. – V. 7. – P. 644.*
3. *Gorkunov M.V., Osipov M.A. // Soft. Matter. – 2011. – V. 7. – P. 4348-4356.*
4. *Burylov S.V., Raikher Yu.L. // Phys. Rev. – 1994. – V. E 50. – P. 358.*
5. *Ахметзянов Р.А., Райхер Ю.Л., Захлевных А.Н. / Сб.: Магнитные свойства ферроколлоидов. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – P. 63-74.*

О ДВОЙНОМ ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ МГД-ВРАЩЕНИИ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРЕ

А.Ф. Зибольд

Донецк, Украина

В работах [1, 2] исследовано трехмерное осесимметричное течение проводящей жидкости, возбуждаемое вращающимся магнитным полем в цилиндре ограниченной длины. Численный эксперимент позволил изучить возникающие при этом пространственные структуры течения и проследить их эволюцию при изменении параметров течения. При малых значениях чисел Гартмана (~ 1) определяющее влияние на структуру оказывает относительная высота сосуда. При малой относительной высоте на половине длины сосуда возникает один интенсивный торцевой вихрь. При увеличении относительной высоты происходит оттеснение этого вихря к торцу и появление в центральной по высоте сосуда зоне слабых пристеночных меридиональных вихрей чередующегося направления вращения, причем зарождаются эти вихри из торцевого вихря, отделяясь от него парами. С возрастанием относительной высоты сосуда число этих малых вихрей увеличивается, а их относительные размеры приближаются к соответствующим размерам вихрей Тейлора, возникающих в бесконечно длинном цилиндре [3]. При увеличении чисел Гартмана $(\sim 15-25)$ центр торцевого вихря располагается на расстоянии $0.05-0.04$ полудлины сосуда от торца, несколько смещаясь к оси сосуда при увеличении относительной высоты цилиндра.

Расчет радиальных профилей азимутальной скорости показал, что практически по всей высоте цилиндра значение скорости остается постоянным, уменьшаясь к торцам. Распределение скорости при малых числах Гартмана носит параболический характер, приближаясь к профилю типа «твердого» вращения при увеличении чисел Гартмана. Максимум скорости смещается при этом к боковой поверхности цилиндра. Распределение азимутальной скорости по высоте сосуда показало, что для достаточно больших чисел Гартмана у торцов цилиндра в месте локализации торцевого вихря возникает двойной ламинарный пограничный слой, причем толщина примыкающего к торцу подслоя приблизительно совпадает с расстоянием от центра вихря до торца и составляет $0.05-0.06$ полудлины сосуда. При малой относительной высоте цилиндра толщина внутреннего слоя достигает ~ 0.3 полудлины сосуда, уменьшаясь до $\sim 0.2-0.15$ при увеличении относительной высоты. Следует отметить, что двойной ламинарный слой возникает именно в области расположения торцевого вихря, смещаясь вместе с вихрем при изменении параметров течения. По мере смещения в радиальном направлении от центра вихря к его периферии этот эффект уменьшается, и за пределами функции тока, соответствующей значению ~ 0.3 от максимального значения в центре вихря, на торце цилиндра существует обыкновенный ламинарный пограничный слой.

Существование на торцах двух ламинарных слоев отмечалось в эксперименте [4].

1. *Zibold A.F. Evolution of the hydrodynamical structure arising in the cylinder of the limited length under action of the rotating magnetic field // Proc. 7th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. Presqu'ile de Giens, France, 2008. – V. 1. – P. 467-472.*
2. *Зибольд А.Ф. Гидродинамические структуры, порождаемые вращающимся магнитным полем в цилиндре конечной длины // Прікладна гидромеханика. – 2011. – Т. 13 (85), № 2. – С. 17-27.*
3. *Капуста А.Б., Зибольд А.Ф. Влияние симметрии вращающегося магнитного поля на устойчивость стационарного осесимметричного течения // Магнитная гидродинамика. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 134-136.*
4. *Капуста А.Б., Дремов В.В., Доронин В.И. Экспериментальное исследование движения ртути во вращающемся магнитном поле // Техническая электромагнитная гидродинамика. Вып. 20 (4). – Донецк: Кн. изд-во, 1970. – С. 187-191.*

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ПЕРЕНОСА В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ

О.Ю. Зиканов[1], Д.С. Краснов[2], П. Дей[1], Т. Боек[2]

[1]*Университет штата Мичиган, Дирборн, США*
[2]*Технический Университет Ильменау, Германия*

Представлены результаты численного моделирования турбулентных МГД течений в канале прямоугольного сечения, трубе, а также в бесконечном плоском канале. Численный метод основан на консервативной конечно-разностной схеме [1, 2] и методе массивно-параллельных вычислений, что позволяет проводить расчеты при больших числах Рейнольдса (Re) и Гартмана (Ha).

В одной из решенных задач [3] рассматривается течение в прямоугольном канале при $Re=10^5$ и Ha между 0 и 400. Обнаружено, что в широком диапазоне значений числа Гартмана течение имеет ламинарные ядро и слои Гартмана, в то время как боковые пограничные слои остаются турбулентными. Изучение свойств турбулентного бокового слоя показало, что он состоит из пограничного подслоя с мелкомасштабной трехмерной турбулентностью и внутреннего подслоя, в котором турбулентность доминируется крупномасштабными сильно анизотропными вихрями.

В следующей задаче анализируется ламинаризация, происходящая при повышении числа Гартмана в течениях в каналах прямоугольного и круглого сечения. Рассмотренный диапазон параметров пересекается с экспериментальным диапазоном в работе Ю. Гартмана и Ф. Лазаруса [4]. Обнаружено, что и при малых числах Рейнольдса и Гартмана существуют промежуточные состояния с зоной турбулентности, ограниченной боковыми слоями. Также найдено, что процесс ламинаризации существенно неоднозначен. Форма течения при увеличении числа Гартмана зависит от начальных условий, численного разрешения и длины расчетной области.

В третьей задаче [5] рассматривается эффект наложенного постоянного магнитного поля различной ориентации на перенос пассивного скаляра в турбулентном течении в плоском канале. В числе других результатов, характеризующих влияние магнитного поля на турбулентный перенос, найдено, что поля двух поперечных ориентаций (параллельной и перпендикулярной стенке) эффективно подавляют перенос.

1. *Krasnov D., Zikanov O. Boeck T. Comparative study of finite difference approaches to simulation of magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds number // Comp. Fluids. – 2011. – V. 50. – P. 46-59.*
2. *Ni M.-J., Munipalli R., Huang P., Morley N.B., Abdou M.A. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number. Part I: On a rectangular collocated grid system // J. Comp. Phys. – 2007. – V. 227. – P. 174-204.*
3. *Krasnov D., Zikanov O., Boeck T. Magnetohydrodynamic duct flow at high Reynolds and Hartmann numbers // J. Fluid Mech., submitted. – 2012.*
4. *Hartmann J., Lazarus F. Hg-dynamics II: Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field // K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. – 1937. – V. 15, N. 7. – P. 1-45.*
5. *Dey P., Zikanov O. Turbulent flow and transport of passive scalar in magnetohydrodynamic channel flows with different orientations of magnetic field // Int. J. Heat Fluid Flow, in press. – 2012.*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ МГД-ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (DNS)

О.Ю. Зиканов[1], Я.И. Листратов[2], Е.В. Свиридов[2], В.Г. Свиридов[2], Д.А. Огнерубов[2]

[1]*Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, шт.Мичиган, США*
[2]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Исследуемая проблема связана с влиянием внешнего магнитного поля на гидродинамику и теплообмен при течении жидкого металла в трубе. Рассматриваются режимы, которые могут встречаться в жидкометаллических контурах охлаждающих систем бланкетов термоядерных реакторов [1].

Известно, что сильное магнитное поле оказывает существенное влияние на структуру потока [2], при этом эффект от влияния магнитного поля чаще всего неочевиден. Например, численные исследования потока жидкого металла в каналах под влиянием поперечного магнитного поля [3] показывают, что в определенном диапазоне чисел Гартмана течение не является ни ламинарным, ни турбулентным. Его поведение, на самом деле, является квазипериодическим. Этот режим характеризуется длительными периодами, в определенных фазах которого проявляется ламинарное течение, а в других — турбулентное. Если рассмотреть задачу о теплообмене в этих условиях, то ситуация осложняется, ввиду того, что дополнительно существенное влияние может оказывать термогравитационная конвекция.

Значительный объём экспериментальных данных по течению жидкой ртути в длинных вертикальных и горизонтальных трубах при воздействии продольного и поперечного магнитного поля [4–7] показывает, что при больших числах Гартмана появляются сильные пульсации температуры. В частности, в горизонтальных трубах с подогревом нижней половины трубы и термически изолированной верхней, интенсивность температурных пульсаций уменьшалась вдоль трубы при числах Гартмана порядка 100, но начинала увеличиваться при Ha = 300 и более, превосходя интенсивность температурных пульсаций в потоке при отсутствии магнитного поля в 2.5 раза.

Анализ экспериментальных данных показал, что пульсации температуры при Ha=300 и более характеризовались низкой частотой, и их причиной, возможно, являлось возникновение термогравитационных вихрей с осями параллельными линиям магнитного поля, которые не подавляются магнитное полем.

В данной работе представляются результаты прямого численного моделирования (DNS) данного процесса в условиях, соответствующих экспериментам.

1. *Smoletsev S., Moreau R., Abdou M. Characterization of key magnetohydrodynamic phenomena for PbLi flows for the US DCLL blanket // Fusion Eng. Design. – 2008. – V. 83. – P. 771-783.*
2. *Fundamental and Applied MHD, Proc. 7th PAMIR Conf. Giens, France, 2008.*
3. *Boeck T. Krasnov D., Thess A., Zikanov O. Large-scale intermittency in MHD channel with spanwise magnetic field // Phys. Rev. Let. – 2008. – V. 101. – 244501.*
4. *Sviridov V. G., Razuvanov N.G., Ivochkin Yu.P., Listratov Ya.I., Sviridov E.V., Genin L.G., Zhilin V.G., Belyaev I.A. // Liquid Metal Heat Transfer Investigations Applied to Tokamak Reactor / Proc. Int. Heat Transfer Conference IHTC14, USA. – 2010. – P. 1-8.*
5. *Sviridov V.G., Razuvanov N.G., Ivochkin Yu.P., Listratov Ya.I., Sviridov E.V. The experimental liquid metal heat transfer investigations applied to fusion reactors // Fundamental and Applied MHD, Proc. PAMIR Conf. Giens, France, 2008. – P. 885-890.*
6. *Sviridov V.G., Ivochkin Yu.P., Razuvanov N.G., Zhilin V.G., Genin L.G., Ivanova O.N., Averianov K.V. Liquid metal MHD heat transfer investigations applied to fusion Tokamak reactor cooling ducts // Magnetohydrodynamics. – 2003. – V. 39, N. 4. – 557-564.*
7. *Sviridov V.G., Shpanskii Yu.S. Effect of the thermogravitational convection and a longitudinal magnetic field on the heat exchange in liquid metal flow through a horizontal pipe*

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА СКОРОСТЕЙ

Н.М. Зубарев, Е.А. Кочурин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Одним из наиболее распространённых типов гидродинамических неустойчивостей является неустойчивость границы раздела двух сплошных сред, имеющих достаточную разность скоростей (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, см. обзор [1]). С прикладной точки зрения неустойчивость Кельвина-Гельмгольца может являться нежелательным эффектом. В связи с этим представляет интерес возможность подавления неустойчивости Кельвина-Гельмгольца внешним горизонтальным магнитным полем. Анализ неустойчивостей поверхности жидкости различного типа во внешнем горизонтальном магнитном поле проведен, например, в работе [2].

В настоящей работе мы исследуем динамику поверхности раздела идеальных жидкостей в ситуации, когда дестабилизирующее влияние неустойчивости Кельвина-Гельмгольца подавляется горизонтальным магнитным полем, и поверхность является нейтрально устойчивой. При этом эволюция системы будет определяться нелинейностью. В работе [3] был предложен подход, позволяющий значительно упростить теоретическое описание динамики диэлектрических жидкостей в электрическом поле, основанный на рассмотрении особого режима движения, при котором потенциалы скорости и электрического поля линейно связаны. Оказалось, что этот подход может быть применим и для магнитных жидкостей, находящихся во внешнем горизонтальном магнитном поле, отношение магнитных проницаемостей которых обратно пропорционально отношению их плотностей. Число уравнений движения при этом сокращается вдвое. На основе редуцированных уравнений построена слабо-нелинейная модель эволюции поверхности, позволяющая аналитически описать взаимодействие локализованных и периодических возмущений границы раздела жидкостей. Для полученных решений эволюция границы не приводит к возрастанию амплитуды ее возмущений и формированию особенностей. Как следствие углы наклона поверхности остаются малыми, и условия применимости теории не нарушаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №10-08-96016-Урал), в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» (проект 12-П-2-1023).

1. *Drazin P.G. // J. Fluid Mech. – 1970. – V. 42. – P. 32.*
2. *Zakaria K. // Physica A. – 2003. – V. 327. – P. 221.*
3. *Zubarev N.M. // Phys. Fluids. – 2006. – V. 18. – 028103.*

ДИНАМИКА МАССОПЕРЕНОСА В ПЛОСКОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ЯДРА МАГНИТНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

А.С. Иванов

ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия

Коллоидные частицы магнитной жидкости, диспергированные в жидкости-носителе, находятся в постоянном движении даже внутри механически покоящегося макроскопического образца. Эти перемещения частиц обусловлены как индивидуальными хаотичными тепловыми движениями, так и коллективным направленным движением в некотором выделенном направлении, обусловленном внешним силовым полем (магнитным, гравитационным и т.п.). Таким образом, даже в покоящемся образце жидкости возможен интенсивный массоперенос (расслоение жидкости), обусловленный макроскопическим дрейфом коллоидных частиц в область пространства с повышенной напряженностью магнитного поля (магнитофорез) или гравитационной седиментацией.

Особый интерес в вопросе расслоения магнитных жидкостей играет случай интенсивного магнитофореза коллоидных частиц при наличии ядра магнитной конденсации внутри самой жидкости. Этот случай интересен необычной динамикой области с повышенной концентрацией магнитной фазы вблизи ядра конденсации [1]. К сожалению, работа [1], являющаяся уникальной в своем роде, была не закончена автором и физическое явление, наблюдавшееся экспериментально, не было систематически исследовано. Также на сегодняшний день отсутствует какое-либо теоретическое описание этой задачи. Цель нашей работы — восполнить недостающую информацию и всесторонне изучить это явление.

Для изучения предлагаемой темы нами была собрана экспериментальная установка, позволяющая изучать массоперенос в магнитной жидкости при наличии ядра магнитной конденсации. В качестве объекта исследования используется магнитная жидкость вида «магнетит–олеиновая кислота – керосин» с объемной долей магнетита $\varphi \approx 0.004$, помещенная в герметичную прямоугольную стеклянную ячейку толщиной 0.4 мм и сторонами ≈ 2 см. В качестве ядра магнитной конденсации используется квазисферическая частица из карбонильного железа, диаметром ≈ 0.37 мм, помещенная в центре ячейки с магнитной жидкостью. Ячейка помещена в рабочей области катушек Гельмгольца, способных создавать высокооднородное магнитное поле с напряженностью до 50 кА/м. Наблюдение за процессом массопереноса происходит с помощью инструментального микроскопа БМИ-1 и встроенной камерой, сопряженной с компьютером. При подключении катушек Гельмгольца к источнику питания вблизи ядра конденсации начинается интенсивный магнитофорез: коллоидные частицы устремляются к магнитным полюсам ядра и скапливаются возле них в виде «облаков» с повышенной концентрацией магнитной фазы. По прошествии примерно 60 минут рост областей с высокой концентрацией φ прекращается. При выключении внешнего магнитного поля области с повышенной φ начинают стремительно (за несколько секунд) расширяться, используя, очевидно, гидродинамический механизм массопереноса: возле ядра конденсации видны струи с высокой φ, распространяющиеся в разные стороны от бывших магнитных полюсов ядра. Следует подчеркнуть, что этот процесс значительно интенсивнее обыкновенной градиентной диффузии и на сегодняшний момент не имеет достаточного экспериментального описания и теоретического толкования. В ближайшем будущем в наши планы входит накопить экспериментальную статистику и теоретически описать полученные результаты.

Работа проводится при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 10-01-96038, №10-02-96022) и ОЭММППУ РАН (проект № 12-Т-1-1008).

1. *Пшеничников А.Ф., Шурубор И.Ю. Динамика областей с повышенной концентрацией ферромагнитных частиц // Статические и динамические свойства магнитных жидкостей. – Свердловск, 1987. – С. 49-53.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МГД-НАСОСОВ ДЛЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ (СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОЙ) МИШЕНИ НЕЙТРОНОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ MEGAPIE ПРОЕКТА

С.Л. Иванов, А.В. Флёров

IPUL (Институт Физики Университета Латвии), Саласпилс, Латвия

Megapie (Megawatt pilot experiment) — международный проект, имеющий целью спроектировать, построить, проверить и вывести из эксплуатации (decommissioning) первую жидкометаллическую свинцово-висмутовую (PbBi) мишень расщепления ядер, функционирующую при выделяющейся мощности немного меньше 1 МВт. Эта мишень используется как нейтронный источник. Нейтроны производятся взаимодействием интенсивного потока протонов (590 МеВ энергии) с мишенью. Этот эксперимент был выполнен в 2006 в Paul-Scherrer Institut (PSI), что находится в посёлке Villigen в Швейцарии. Мишень была установлена в зале SINQ. В настоящее время проводится разборка и исследование образцов материалов MEGAPIE-мишени.

Система МГД-насосов (СМГДН), важная часть MEGAPIE-мишени была разработана в Институте Физики, опираясь на уникальный опыт проектирования высокотемпературных насосов для ядерно-энергетических устройств космического назначения.

СМГДН поддерживала поток PbBi между теплообменником и окном входа луча для обеспечения отвода тепловой энергии. Требование того, что СМГДН должна работать в условиях MEGAPIE-мишени в течение минимум 10 000 часов не тривиальная задача по следующим причинам:

- СМГДН погружена в PbBi, температура которого колеблется в зависимости от «гуляния» протонного пучка в диапазоне 230-380°C с изменением температуры до 5-10°C/сек. Тонкие стенки аустенитной стали 316 L защитной оболочки должны выдерживать минимум 10 000 циклов термонапряжений. Стенки необходимы для защиты МГД-насосов и расходомеров от прямого контакта с PbBi;
- Объем насосов является весьма ограниченным в MEGAPIE-мишени поэтому нагрузки электрических и магнитных цепей насосов близки к предельным, что приводит к интенсивным тепловыделениям. Теплообмен между МГД-насосами и PbBi является единственным механизмов охлаждения обмоток насосов. Минимизация тепловыделений, с одной стороны, и тепловое сопротивление между индукторами насосов и защитного корпуса (минимальные пробелы, заполнение материалами с хорошей тепловой проводимостью и т.д.), с другой стороны, являются способами повышения эффективности охлаждения;
- Условия эксплуатации СМГДН (высокая температура, облучение, магнитное поле, механические напряжения) накладывают сильные ограничения на структурные и активные материалы.

Для этих жестких условий на основании оригинальных электродинамических, термогидравлических и механических расчетов осуществлено проектирование СМГДН и выполнено обоснование её работоспособности. Предложена процедура косвенного слежения за потоком PbBi через мониторинг электрических параметров МГД-насосов и температуры PbBi. Процедура основана на взаимосвязи между температурой PbBi на входе и выходе насоса, скорости потока и электрического режима работы насоса.

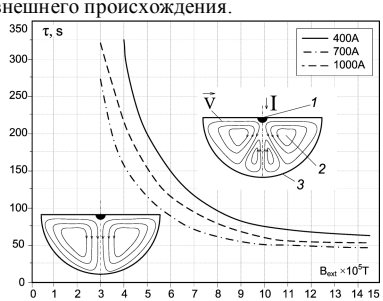
Успешное проведение MEGAPIE эксперимента расширило интерес к использованию жидких металлов для мишеней. Опыт проектирования МГД-насосов для мишеней ядерных расщеплений тяжёлых жидких металлов в ближайшее время найдёт широкий спрос.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОЕ С УЧЕТОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЗАКРУТКИ И ПРОГИБА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков, А.А. Гусева

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Представлены результаты численного и экспериментального исследования электровихревого течения (ЭВТ), образующегося в результате силового взаимодействия пропускаемого через жидкий металл электрического тока с магнитными полями собственного и внешнего происхождения.



Зависимость времени образования второго вихря от значений индукции внешнего магнитного поля и силы электрического тока: *1*, *3* – малый и большой электроды; *2* – жидкий металл

Опыты, моделирующие тепловые и гидродинамические процессы при электрошлаковой сварке и электрошлаковом переплаве выполнены на рабочем участке, представляющем собой медную полусферическую емкость, заполненную эвтектическим сплавом In–Ga–Sn. Для измерения мгновенной скорости при токе $I \leq 400$ А применялись оригинальные волоконно-оптические преобразователи. Полученные опытные данные использовались для проверки результатов численных расчетов.

Результаты экспериментов и тестированных вычислений свидетельствуют, что наиболее вероятной причиной спонтанной горизонтальной закрутки осесимметричных ЭВТ является силовое взаимодействие электрического тока с относительно слабыми по интенсивности магнитными полями различного происхождения, включая магнитное поле Земли. При отсутствии горизонтальной закрутки ЭВТ представляет собой осесимметричный тороидальный вихрь (см. рисунок), движение на свободой поверхности направлено в сторону центрального (малого) электрода. Вращение ЭВТ в горизонтальной плоскости приводит к образованию второго тороидального вихря и возникновению подъемного осевого течения, направленного противоположно основному ЭВТ. С помощью численного эксперимента было обнаружено и косвенным образом подтверждено опытными данными по полям температуры, что, помимо течений с одним или двумя устойчивыми вихрями в рабочей ванне, возможно существование ЭВТ в колебательном режиме, т.е. в условиях периодического роста и ослабления (пропадания) вторичного вихря. Исследованы характеристики одиночного и двухвихревого режимов течения при различных значения силы токах и индукции внешнего магнитного поля.

Установлено, что, также как горизонтальное вращение, воздействие электромагнитной силы на жидкость в области вблизи малого электрода приводит к образованию воронки под электродом. Эта воронка углубляется с ростом электрического тока вплоть до образования электрической дуги. При этом из-за уменьшения площади контакта электрода с металлом происходит существенное увеличение плотности тока и изменение картины течения, включая усиление вращения расплава. Проведено численное моделирование прогиба свободной поверхности, а также полей скорости с учетом изменения геометрии системы, распределения плотности тока и магнитного поля. Результаты расчета критического значения электрического тока, при котором возможно образование электрической дуги между малым электродом и жидким металлом удовлетворительно согласуются с экспериментальными наблюдениями.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

О.В. Казак

Донецкий национальный университет, Донецк, Украина

Работа посвящена моделированию и управлению электровихревыми течениями (ЭВТ) расплавленного металла в дуговых электросталеплавильных печах постоянного тока с подовым электродом. В последнее время для выплавки металла все большее распространение получают печи с подовым электродом, работающие на постоянном токе. Примерная схема такой печи с двумя электродами приведена на рисунке 1, где 1 — огнеупорная футеровка, 2 — жидкий металл, 3 — электроды, $\vec{j}$ и $\vec{B}$ — линии плотности тока и магнитной индукции. Эксплуатация таких печей показала повышенный износ футеровки в области подового электрода. Предположительной причиной повышенного износа является вихревое движение расплава металла. При этом основной причиной вихревого течения расплава являются ЭВТ.

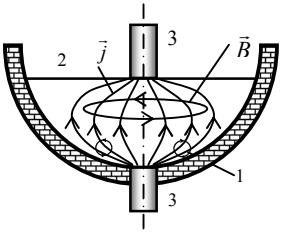


Рис. 1. Модель печи

В работе приводится постановка задачи, физическая и математическая модель протекающих процессов. Разработан алгоритм решения задачи и получены результаты полей скорости движения расплава стали, выполненные с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS CFX и COMSOL. Выяснено существенное влияние на результаты расчетов размеров и формы расчетной сетки, а также граничных условий [1]. Произведен расчет полей скорости в расплаве [2, 3]. Изучено влияние свободной конвекции на электровихревые течения.

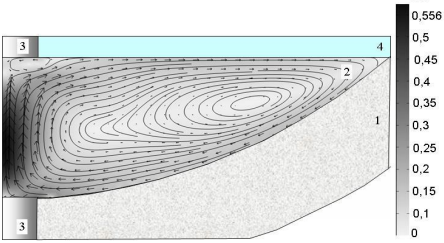


Рис. 2. Поле скорости движения расплава

На рисунке 2 приведено векторное и контурное поле скорости движения расплава, обусловленное силой Лоренца, с учетом термогравитационной конвекции. Значение силы Лоренца достигало 30% от объемной силы тяжести. Движение расплава при этом носит вихревой характер. Вихрь зарождается в расплаве в области подовых электродов и затем поднимается вверх. Максимальная скорость движения расплава — 0,5 м/с.

Исследования проводились как для осесимметричных цилиндрических печей, так и для новейших печей сложной геометрической формы, в том числе и для 420-тонной печи фирмы DANIELI [2, 3]. Результаты расчетов сравнивались с аналитическими оценками, расчетами различными программными пакетами и экспериментальными данными по повышенному износу футеровки. Хорошее согласование данных, полученных разными способами, говорит о достоверности результатов компьютерного моделирования.

Анализ результатов компьютерного моделирования ЭВТ в металлургических печах позволил предложить методы для снижения скорости движения расплава в непосредственной близости подовых электродов, где действие ЭВТ негативно, и предложить рекомендации по оптимизации работы печей.

1. *Kazak O., Semko O. Electrovortex field in DC arc steel making furnaces with bottom electrode // Ironmaking and Steelmaking. – 2011. – V. 38, N. 4. – P. 273-278.*
2. *Казак О.В., Семко А.Н. Электровихревое движение расплава в печах постоянного тока с подовым электродом // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, №1. – С. 209-217.*
3. *Kazak O., Semko O. Modelling magnetohydrodynamic processes in DC arc steel making furnaces with bottom electrodes // Ironmaking and Steelmaking. – 2011. – V. 38, N. 5. – P. 353-358.*

ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ РАСПЛАВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВМП В ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА

А. Капуста[1], Б. Михайлович[2], Б. Тильман[1], М. Хавкин[3]

[1]*Center for MHD Studies, Beer Sheva, Israel*
[2]*Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva, Israel*
[3]*Energetics Technologies, Beer Sheva, Israel*

На УНРС с индукторами ВМП, расположенными внутри, либо вокруг кристаллизатора, часть жидкой сердцевины слитка, в которой возбуждается ВМП, составляет 14-17 % полной длины жидкой сердцевины. В этом случае использование обычной модели «внешнего» трения приводит к завышенным (в 1.5-2 раза) значениям угловой скорости вращения расплава в кристаллизаторе и ниже.

Чтобы получить правильные значения угловой скорости вращения, выполнены эксперименты на низкотемпературной лабораторной модели жидкой сердцевины полунепрерывного слитка квадратного поперечного сечения и разработана простая математическая модель, при формулировке которой использовались результаты лабораторного эксперимента.

МГД-процессы в этом случае описываются в безындукционном приближении с использованием модели «внешнего» трения следующими безразмерными уравнениями в сферической системе координат r, ϕ, θ:

$$\frac{\partial^2\Omega_1}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial\Omega_1}{dr}-\lambda_1\Omega_1=-2\mathrm{Ha}^2\left(1-\Omega_1\right); \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2\Omega_2}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial\Omega_2}{dr}-\lambda_2\Omega_2=0\ ; \tag{2}$$

с граничными условиями

$$\left.\frac{\partial\Omega_1}{dr}\right|_{r=1}=0;\ \left.\Omega_2\right|_{r=0}=0\ ; \tag{3}$$

и условиями непрерывности и гладкости значений Ω на поверхности $r=r_1$, отделяющей области с ВМП и без ВМП

$$\left.\Omega_1\right|_{r=r_1}=\left.\Omega_2\right|_{r=r_1};\ \left.\frac{\partial\Omega_1}{dr}\right|_{r=r_1}=\left.\frac{\partial\Omega_2}{dr}\right|_{r=r_1}, \tag{4}$$

где Ω_1 и Ω_2 — соответственно угловые скорости вращения расплава в ВМП и ниже, $\mathrm{Ha}_a=B_aR_0\theta_0\sqrt{\sigma/\eta}$, λ_1, λ_2 определяются по результатам модельного эксперимента, $r=R/R_0$.

Решение задачи (1)–(4) имеет вид

$$\Omega_1=\frac{1}{\sqrt{r}}\left\{C_1I_{1/2}\left(\beta r\right)+C_2K_{1/2}\left(\beta r\right)\right\}+\frac{2\mathrm{Ha}^2}{\beta^2}; \tag{5}$$

$$\Omega_2=\frac{C_3}{\sqrt{r}}I_{1/2}\left(\sqrt{\lambda_2}r\right), \tag{6}$$

где $\beta=\sqrt{\lambda_1+2\mathrm{Ha}^2}$, C_1, C_2, C_3 — постоянные интегрирования.

При значениях $\lambda_2=80$, расчетный профиль угловой скорости практически совпадает со средним значением скорости в кристаллизаторе и хорошо аппроксимирует профиль скорости в области 2, полученный в эксперименте.

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БЛАНКЕТЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В РФ

И.Р. Кириллов

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург, Россия

Бланкет (от английского — одеяло, покров) является элементом термоядерного реактора (ТЯР), охватывающим плазму, и предназначенным для воспроизводства трития, поглощения энергии нейтронов с отводом тепла в систему преобразования тепловой энергии в электрическую и для радиационной защиты.

Рассматриваются требования к бланкетам и сравниваются типы бланкетов, предложенные для сооружения демонстрационного (ДЕМО) ТЯР в ближайшей и отдаленной перспективе.

Описываются варианты конструкций бланкетов, разрабатываемые странами участницами проекта международного термоядерного реактора (ИТЭР) для испытаний в ИТЭР, цели и задачи испытаний.

Разработка в РФ бланкетов ДЕМО реактора и испытательных модулей бланкета (ИМБ) ИТЭР, где для охлаждения и наработки трития используется жидкий металл, ведется с перерывами с 1998 г. [1-7].

Описывается конструкция таких бланкетов и НИР, выполняемые в поддержку конструктивных решений. Оценивается современное состояние работ в РФ и перспективы.

Рассматриваются основные проблемы жидкометаллических бланкетов с точки зрения магнитной гидродинамики [8, 9]:

– уменьшение МГД потерь давления, вызванных взаимодействием индуцированных в жидком металле электрических токов с магнитным полем реактора (создание электроизоляционных барьеров на границе стенка–жидкий металл);

– теоретический и экспериментальный анализ течения жидкого металла в каналах сложной геометрии в многокомпонентном магнитном поле;

– теоретический и экспериментальный анализ теплообмена в жидких металлах в магнитном поле при наличии сложного характера течения, влияния магнитного поля на пульсационные характеристики течения и термогравитационную конвекцию.

1. *Sokolov Y.A. Overview of Russian DEMO plant study // Fusion Eng. Des. – 1995. – V. 29. – P. 1-27.*
2. *Sokolov Y.A. et al. Russian DEMO plant study // Fusion Eng. Des. – 1998. – V. 1. – P. 525-533.*
3. *Shatalov G. et al. Russian DEMO-S reactor with continuous plasma burn // Fusion Eng. Des. – 2000. – V. 51-52. – P. 289-298.*
4. *Kirillov I.R. RF DEMO Team, Lithium Cooled Blanket of RF DEMO Reactor // Fusion Eng. Des. – 2000. – V. 49-50. – P. 457-465.*
5. *Kolbasov B.N.et.al. Russian concept for a DEMO-S demonstration fusion power reactor // Fusion Engineering Design. – 2008. – V. 83. – P. 870-876.*
6. *Kirillov I.R. and RF TBM Team. Lithium self-cooled blanket test module for ITER // 4th Int. Conf. on Magnetohydrodynamic at Dawn of Third Millenium, 2000. – V. 1. – P. 291-296.*
7. *Wong C.P.C. et.al. Overview of liquid metal TBM concepts and programs // Fusion Eng. Des. – 2008. – V. 83. – P. 850-857.*
8. *Kirillov I.R. et.al. Present understanding of MHD and heat transfer phenomena for liquid metal blankets // Fusion Eng. Des. – 1995. – V. 27. – P. 535-569.*
9. *Morley Neil B. et.al. Liquid magnetohydrodynamics – recent progress and future directions for fusion // Fusion Eng. Des. – 2000. – V. 51-52. – P. 701-713.*

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ЭМН С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КАНАЛОМ

И.Р. Кириллов, Д.М. Обухов, Преслицкий Г.В.

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

Электромагнитные насосы (ЭМН) представляют собой индукционные машины с жидкометаллическим рабочим телом. Одним из наиболее распространенных типов индукционных ЭМН являются линейные насосы с цилиндрическим каналом — ЦЛИН.

Многолетний опыт создания, исследования и эксплуатации ЦЛИН показал наличие в их характеристиках пульсаций давления различной частоты и интенсивности. По частотным характеристикам пульсации давления в ЦЛИН могут быть разделены на два типа: пульсации удвоенной частоты питающего обмотку машины тока и пульсации низкой частоты (0-10 Гц). Причиной пульсаций удвоенной частоты является разомкнутость магнитной системы насоса по длине и связанные с этим концевые эффекты. Низкочастотные пульсации, как показывают исследования, связаны с характером течения жидкого металла в канале в условиях взаимного влияния электромагнитных и гидродинамических характеристик ЦЛИН.

Экспериментальные исследования проблемы возникновения пульсаций давления проводились в НИИЭФА на базе моделей и промышленных образцов ЭМН средней и большой мощности [1–3]. Исследования включали в себя анализ спектров сигналов датчиков давления, распределения индукции магнитного поля и скоростей жидкого металла по азимуту каналов насосов.

Параллельно экспериментальным исследованиям проводились и численные расчеты на базе полностью двумерной модели ЦЛИН EMP-MHD2D [4]. Модель основана на совместном решении уравнений для индуцированного в жидком металле магнитного поля и уравнения движения и позволяет получить интегральные, локальные и пульсационные характеристики ЦЛИН, в том числе при значении магнитного числа Рейнольдса больше единицы.

По результатам исследований были предложены практические рекомендации по градации витков обмотки насосов, что позволяет существенно уменьшить амплитуды пульсаций давления удвоенной частоты. Также в результате исследований установлено, что параметрами, определяющими границу возникновения низкочастотных пульсаций давления, следует считать магнитное число Рейнольдса R_m и параметр электромагнитного взаимодействия N.

1. *Кириллов И.Р., Остапенко В.П. Локальные характеристики цилиндрического индукционного насоса при $R_m s > 1$ // Магнитная гидродинамика. – 1987. – № 2. – С. 95-102.*
2. *Кебадзе Б.В., Кириллов И.Р., Кондратьев В.И., Огородников А.П., Остапенко В.П., Смирнов А.М. Исследование неустойчивых режимов работы цилиндрического линейного индукционного насоса // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 4. – С. 89-94.*
3. *Araseki H., Kirillov I.R., Preslitsky G.V., Ogorodnikov A.P. Magnetohydrodynamic instability in annular linear induction pump. Part I: Experimental and numerical analysis // Nucl. Eng. Des. – 2004. – V. 227. – P. 29-50.*
4. *Кириллов И.Р., Обухов Д.М. Полностью двумерная модель для анализа характеристик линейного цилиндрического индукционного насоса // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, № 8. – С. 37-43.*

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ПРОЦЕСС ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КИПЕНИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Е.М. Клименко, А.Я. Симоновский

Ставропольский государственный университет, Ставрополь, Россия

Данная работа посвящена изучению влияния низкочастотного магнитного поля (до 10 Гц) на частоту образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования.

Объектом исследования служила магнитная жидкость (МЖ), типа магнетит в керосине, стабилизированная олеиновой кислотой, с объемной концентрацией дисперсной фазы 5,75% и плотностью 1040 кг/м^3. Частоту образования пузырьков пара при кипении МЖ измеряли при помощи системы измерительных индукционных катушек. Выбор индукционного метода исследования обусловлен тем, что ни оптические методы, ни применение электродов не подходит, так как используемая жидкость не прозрачная и обладает слабой проводимостью. Показания индукционных датчиков записывались при помощи автоматизированной системы (компьютера, платы АЦП и программы ADCLab) в виде осциллограмм.

Экспериментальные исследования показали, что в низкочастотном магнитном поле частота парообразования в несколько раз меньше, чем в постоянном магнитном поле. Также было обнаружено, что в магнитном поле частотой от 5 Гц до 10 Гц увеличение частоты парообразования происходит плавно, по сравнению с экспериментами в магнитном поле частотой от 1 Гц до 5 Гц, где частота увеличивается резко.

Таким образом, авторами показано существенное влияние низкочастотного магнитного поля на процесс пузырькового кипения магнитной жидкости на одиночном центре парообразования.

НАСКОЛЬКО РЕАЛЬНЫ СРЕДНИЕ ПОЛЯ В ПРИРОДЕ?

Н.И. Клиорин

Беер-Шева, Израиль

Рассматриваются свойства усреднённых по турбулентным пульсациям уравнений термо-магнито-гидродинамики. На примере двух детально изученных в последнее время явлений рассматривается вопрос о реальности средних полей.

Первое явление — явление отрицательного магнитного давления в турбулентной проводящей среде и связанная с ним неустойчивость — формирование магнитных трубок из первоначально однородного среднего магнитного поля. Показано, что решение *усредненных уравнений* магнито-гидродинамики практически идеально описывает *усредненное решение точных уравнений* магнито-гидродинамики, включая нелинейную фазу неустойчивости отрицательного эффективного магнитного давления (NEMPI) в хорошо проводящей турбулентной среде.

Второе явление — турбулетная конвекция в воздухе в прямоугольном сосуде (число Релея $\mathrm{Ra} \sim 10^7 \div 10^8$). Экспериментально показано, что в этом случае среднее течение имеет вид коротких роликов и чрезвычайно устойчиво — существует часами. Обнаруженные течения детально изучены с помощью метода PIV. Установлено, что турбулентные вихри при этом имеют относительно малый размер — ~ 0.1 размера экспериментальной установки, а время их жизни ~ 0.2 секунды. При этом скорости турбулентности и средних течений сравнимы.

Свойства наблюдаемых течений могут быть хорошо поняты в рамках *усредненных уравнений* термо-гидродинамики, включая относительные размеры турбулентных вихрей, скорости течений и т.д.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУЙНЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТОКАМАКОВ

А. Клюкин

Institute of Physics of University of Latvia, Salaspils, Latvia

В рамках Ассоциации EURATOM Латвийского Университета Институт физики — Саласпилс в течение ряда лет активно участвует в работах посвященных исследованиям по международной программе ITER, а в настоящее время и по новой международной программе DEMO.

Хотя в программе ITER одной из актуальных задач остается задача защиты первой стенки реактора токамака: стенки, контактирующей с плазмой; использование жидких металлов для создания защитных устройств — лимитеров, не рассматривается в качестве основного варианта. Тем не менее, создание служащих этим целям самовосстанавливающихся жидкометаллических устройств, остается перспективным направлением работ и требует экспериментальной проработки.

Институт физики Латвийского Университета (IPUL, Саласпилс) совместно с Instituto de Plasma e Fusaõ Nuclear / IST (Португалия) спроектировали и построили жидкометаллический контур, работающий на галлии и сочлененный с малым токамаком ISTTOK и выполнили серию экспериментов на токамаке, моделирующих взаимодействие струйного галлиевого жидкометаллического лимитера с плазмой.

В докладе приводятся схема эксперимента, параметры струи, результаты исследования длины распада струи, а также параметры токамака и результаты выполненных исследований на токамаке в Португалии.

С 2011 года начаты работы по новой международной программе DEMO. Эта программа посвящена созданию демонстрационного энергетического термоядерного реактора. Одной
из самых актуальных проблем в этом проекте является задача проектирования реально функционирующего дивертора — устройства, предназначенного для вывода продуктов термоядерной реакции из зоны горения. Известно, что для поддержания устойчивого горения термоядерной реакции, концентрация участвующих в реакции частиц должна поддерживаться в строгой пропорции, а возникающие в результате реакции продукты должны выводиться из зоны горения. Продукты термоядерной реакции представляют собой высокоэнергетичные заряженные частицы, в основном ядра гелия и трития, которые по специально созданным магнитным силовым линиям — сепаратрисам, выводятся в диверторную камеру, где должны улавливаться, отдавать энергию (составляющую до 30 % от общей энергии термоядерной реакции!) и выводиться в другие вспомогательные системы на разделение и переработку. Проблема поглощения энергии этих частиц остается одной из труднейших инженерных задач. Трудность состоит в том, что нужно поглотить энергию порядка 10-15 МВ/м^2 и такую нагрузку долго не выдерживает практически ни одна мишень. Высокоэнергетичные частицы, в сущности, быстро разрушают ее и требуется частая замена выходящих из строя элементов. Альтернативы использованию самовосстанавливающихся жидкометаллических поверхностей при создании таких устройств, по-видимому нет.

В докладе приводятся схема эксперимента и результаты исследования течения, образующегося при взаимодействии наклонной струи с плоской пластиной в присутствии сильного магнитного поля, как одной из ситуаций в возможной модульной системе жидкометаллического дивертора.

ТЕЧЕНИЯ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Ю.Б. Колесников, А. Тесс

Institute of Thermodynamics and Fluid Mechanics,
Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany

Рассматриваются экспериментальные исследования генерации крупномасштабных вихрей в жидком металле в области неоднородного магнитного поля благодаря действию неоднородной силы Лоренца, направленной противоположно потоку жидкости. В этом случае магнитное поле в жидкости ведет себя как магнитное препятствие. Течение характеризуется появлением застойной зоны в области магнитного поля и формированием затем последовательности интенсивных крупномасштабных вихревых структур, содержащих от одной до трех пар вихрей, в зависимости от соотношения электромагнитных и инерционных сил. Указанные структуры деформируясь сохраняются и в развитом турбулентном режиме течения. Приводятся картины визуализации вихревых структур с одновременным измерением силы Лоренца. Аналогичные структуры были также получены при численном моделировании в работах [1, 2]. Рассматриваются пути интенсификации процессов переноса при обтекании магнитных неоднородностей, подобные рассмотренным в работе [3] при формировании слоев Ладфорда при обтекании усеченных тел в поперечном магнитном поле. На основе этих и проведенных ранее исследований в работах [4–6] далее мы рассматриваем бесконтактный метод измерения скорости (расхода) в электрически проводящей жидкости (Лоренц-сила-анемометрия — ЛСА), в котором жидкость подвергается воздействию локального магнитного поля и одновременно измеряется сила, действующая на магнитную систему, равная по величине силе Лоренца в жидкости. Измеренная сила является пропорциональной осредненной скорости течения. Мы иллюстрируем физические принципы метода ЛСА и результаты всесторонних лабораторных экспериментов, которые характеризуют его достаточную чувствительность. Затем, мы представляем результаты тестов ЛСА в алюминиевой промышленности, где ЛСА зарекомендовал себя хорошо в напряженных индустриальных условиях. Анализ показывает, что у измерителя ЛСА, если он должным образом разработан, есть широкий диапазон потенциальных металлургических приложений.

1. *Votyakov E.V., Kolesnikov Yu., Andreev O., Zienicke E., Thess A. // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 98, N. 14. – 144504.*
2. *Votyakov E.V., Zienicke E., Kolesnikov Yu.B. // J. Fluid. Mech. – 2008. – V. 610. – P. 131-156.*
3. *Kolesnikov Yu.B., Andreev O. // J. Exp. Thermal Fluid Sci. – 1997. – V. 15, N. 2. – P. 82-90.*
4. *Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – 164501.*
5. *Thess A., Votyakov E., Knaepen B., Zikanov O. // New J. Phys. – 2007. –V. 299. – P. 1-27.*
6. *Kolesnikov Y., Karcher Ch., Thess A. // J. Metall. Mater. Transactions B. – 2011. – V. 42. – P. 441–50.*

ТЕЧЕНИЯ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Колесников Ю.Б., Тесс А.

Institute of Thermodynamics and Fluid Mechanics, Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany

Рассматриваются экспериментальные исследования генерации крупно-масштабных вихрей в жидком металле в области неоднородного магнитного поля благодаря действию неоднородной силы Лоренца, направленной противоположно потоку жидкости. В этом случае магнитное поле в жидкости ведет себя как магнитное препятствие. Течение характеризуется появлением застойной зоны в области магнитного поля и формированием затем последовательности интенсивных крупномасштабных вихревых структур, содержащих от одной до трех пар вихрей, в зависимости от соотношения электромагнитных и инерционных сил. Указанные структуры, деформируясь, сохраняются и в развитом турбулентном режиме течения. Приводятся картины визуализации вихревых структур с одновременным измерением силы Лоренца. Аналогичные структуры были также получены при численном моделировании в работах [1, 2]. Рассматриваются пути интенсификации процессов переноса при обтекании магнитных неоднородностей, подобные рассмотренным в работе [3] при формировании слоев Ладфорда при обтекании усеченных тел в поперечном магнитном поле. На основе этих и проведенных ранее исследований в работах [4–6] далее мы рассматриваем бесконтактный метод измерения скорости (расхода) в электрически проводящей жидкости (Лоренц-сила-анемометрия — ЛСА), в котором жидкость подвергается воздействию локального магнитного поля и одновременно измеряется сила, действующая на магнитную систему, равная по величине силе Лоренца в жидкости. Измеренная сила является пропорциональной осредненной скорости течения. Мы иллюстрируем физические принципы метода ЛСА и результаты всесторонних лабораторных экспериментов, которые характеризуют его достаточную чувствительность. Затем, мы представляем результаты тестов ЛСА в алюминиевой промышленности, где ЛСА зарекомендовал себя хорошо в напряженных индустриальных условиях. Анализ показывает, что у измерителя ЛСА, если он должным образом разработан, есть широкий диапазон потенциальных металлургических приложений.

1. *Votyakov E.V., Kolesnikov Yu., Andreev O., Zienicke E., Thess A. // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 98, N. 14. – 144504.*
2. *Votyakov E.V., Zienicke E., Kolesnikov Yu.B. // J. Fluid. Mech. – 2008. – V. 610. – P. 131-156.*
3. *Kolesnikov Yu. B., Andreev O. // J. Exp. Thermal Fluid Sci. – 1997. – V. 15, N. 2. – P. 82-90.*
4. *Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – 164501.*
5. *Thess A., Votyakov E., Knaepen B., Zikanov O. // New J. Phys. – 2007. – V. 299. – P. 1-27.*
6. *Kolesnikov Y., Karcher Ch., Thess A. // J. Metall. Mater. Transactions B. – 2011. – V. 42. – P. 441-50.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ НА ДВУХФАЗНУЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНУЮ СРЕДУ В ПЛОСКОМ СЛОЕ

И.В. Колесниченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

В данной работе численно исследуется воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду, которая представляет собой электропроводную жидкость, содержащую включения малой концентрации. Воздействие сил осуществляется в магнито-гидродинамическом (МГД) канале плоской формы, что позволяет существенно повысить величину сил [1]. В нем создаются скрещенные электрический ток и магнитное поле. Метод воздействия основан на том, что на включения и на жидкость, которые имеют разную электропроводность, электромагнитные силы будут действовать по-разному. Основное применение этого метода связано с металлургическими процессами очистки расплавленного металла от слабопроводящих включений и выделения остаточного металла из расплава солей и шлаков.

Уравнения описывают поведение включений и проводящей жидкости в МГД-канале с учетом взаимодействия между включениями и воздействием включений на поток жидкости для изотермического случая. Электродинамическая часть основана на законах Максвелла, Ома и Ампера, гидродинамическая — на уравнениях Навье-Стокса для двухфазной среды и неразрывности, использована полуэмпирическая ка-омега модель для описания турбулентности. В данной постановке используется безындукционное приближение, справедливое при малых магнитных числах Рейнольдса, которое позволяет электродинамическую и гидродинамическую части задачи исследовать по отдельности [2]. Используется приближение плоского слоя, справедливое для слоев, толщина которых много меньше планарных размеров, которое позволяет перейти к двумерной постановке задачи [2].

Расчеты показали, что в ходе процесса МГД-сепарации коэффициент осаждения, который равен отношению концентрации в нижней части канала к концентрации в верхней части канала, для всех фракций изменяется, что говорит о ходе процесса МГД-сепарации в такой системе. Получена зависимость коэффициента очистки для различных параметров процесса. Коэффициент очистки возрастает с ростом магнитного поля при неизменном значении электрического тока, при этом при одном и том же токе эффективнее происходит очистка хорошо проводящих включений, чем непроводящих.

1. *Хрипченко С.Ю., Колесниченко И.В., Сухановский А.Н. Устройство для очистки расплавленного металла от неметаллических включений. – Патент РФ № 2198231 Бюлл. изобрет., 2003.*
2. *Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G. Flow in a square layer of conducting liquid // Magnetohydrodinamics. – 2005. – V. 41, N. 1. – P. 39-51.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ ЖИДКОГО НАТРИЯ В ТОРОИДАЛЬНОМ КАНАЛЕ

И.В. Колесниченко, Р.А. Степанов, Р.И. Халилов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

В работе проводятся исследования поля скорости индукционным способом. На тороидальный канал воздействует внешнее переменное магнитное поле. В канале и в жидком натрии индуцируются вихревые токи, магнитное поле которых искажает первичное поле. Если натрий движется относительно регистрирующих катушек, имеет место перенос магнитного поля. Отклик регистрируется с помощью системы измерительных катушек, расположенных вне канала. Меняя частоту внешнего магнитного поля можно менять глубину его проникновения, тем самым осуществляя сканирование по глубине канала.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

И.В. Колесниченко[1,2], Р.И. Халилов[1], А.М. Павлинов[3], Б.М. Михайлович[4]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[4]*Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva, Israel*

Исследуется метод генерации течения, а также само течение электропроводной жидкости (расплавленный металл), которая расположена в цилиндрическом объеме, помещенном во внешний индуктор. Индуктор имеет форму цилиндра с отверстием в центральной части, в котором помещена емкость с металлом. Индуктор внутри этого отверстия генерирует бегущее и вращающееся переменные магнитные поля. Переменное поле вызывает появление вихревого электрического тока в жидком металле. В результате взаимодействия электрического тока и магнитного поля в жидком металле генерируется вихревая электромагнитная сила. Эта сила генерирует вихревое перемешивающее течение. Неоднородное действие силы приводит к появлению неустойчивого, как правило, течения сложной вихревой структуры.

В работе исследовано поле скорости внутри цилиндрического рабочего объема МГД-перемешивателя с помощью ультразвукового доплеровского анемометра. Для этого изготовлена экспериментальная установка, которая заполнялась галлиевым сплавом. Установка помещалась в рабочий цилиндрический объем перемешивателя, где на нее действовало бегущее либо вращающееся магнитное поле, или оба поля сразу. Использовалось несколько датчиков UDV 4 MHz расположенных в ряд. Они опрашивались в мультиплексорном режиме. Это позволило получить распределение скорости. В нашем случае течение было не устойчиво уже при умеренных режимах перемешивания. Это проявлялось в низкочастотных колебаниях профилей скорости. Колебания были вызваны перемещениями крупномасштабных вихревых структур по области с жидким металлом. Временного разрешения системы измерения UDV оказалось достаточно для регистрации этих колебаний, несмотря на использование мультиплексора. Произведены оценки средних значений скорости и уровня пульсаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №10-08-96048-r-ural-a) и субсидии проекта Международной исследовательской группы «Магнитогидродинамическое перемешивание жидкого металла и его воздействие на структуру затвердевающих сплавов».

МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МАСЛА «АЛКАРЕН»

В.В. Королев, Д.В. Королев, А.Г. Рамазанова, В.И. Яшкова

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

Интерес к изучению магнитотепловых свойств в магнитных коллоидах связан с тем, что при переходе магнетика в наносостояние его теплоемкость и магнитокалорический эффект резко меняются. Информация об изменении величин магнитокалорического эффекта (МКЭ) и теплоемкости позволяет судить о магнитных фазовых перехода и о природе магнитного упорядочивания веществ.

В работе было проведено изучение магнитных жидкостей (МЖ) на основе вакуумного масла «Алкарен». Все исследуемые магнитные жидкости были ультрамикрогетерогенными системами, содержащими в качестве дисперсной фазы наночастицы магнетита, стабилизированные мономолекулярным слоем олеиновой кислоты [1]. Исследование магнитокалорического эффекта и теплоемкости магнитных жидкостей на основе вакуумного масла «Алкарен» с различной намагниченность было проведено в температурном интервале 278÷348 К и в магнитных полях 0÷1 Тл. МКЭ и теплоемкость были рассчитаны в соответствии с методикой описанной [2].

В низкоконцентрированных МЖ на полевых зависимостях имеет место нелинейное увеличение значений МКЭ. В высококонцентрированных магнитных жидкостях (конц. магн. фазы 55% и 64.8%) с высокой намагниченностью обнаружено иное поведение МКЭ от величины магнитного поля. МКЭ с ростом магнитного поля увеличивается скачком и происходит насыщение МКЭ уже в малых магнитных полях. Скачкообразное увеличение МКЭ в концентрированных МЖ с высокой намагниченностью уже в малых полях связано с образованием агрегатов цепочечных структур магнитных частиц. На температурных зависимостях при всех магнитных полях с ростом температуры происходит монотонное уменьшение значений МКЭ для всех МЖ на основе синтетического масла «Алкарен». В магнитных жидкостях впервые установлена зависимость МКЭ от концентрации магнитной фазы. Значения МКЭ частиц магнетита превышают значения МКЭ магнитной жидкости при всех исследуемых температурах. Для оценки охлаждающей способности магнитных жидкостей было определено при 298 К количество теплоты (Q), выделившееся в результате МКЭ при изменении индукции магнитного поля от 0 до 1 Тл. Для магнитной жидкости с намагниченностью 60 кА/м и с концентрацией 55 масс %, эта величина составляет 30.17 Дж/кг. Величина удельной теплоёмкости для всей МЖ монотонно возрастает с ростом температуры и практически не зависит от индукции магнитного поля.

1. *Рамазанова А.Г., Королев В.В., Яшкова В.И., Балмасова О.В. Многофункциональные магнитные жидкости // XI Международная конференция «Проблемы сольватации и комплексообразования в растворах», Иваново, октябрь 2011.*
2. *Королев Д.В. Магнитотепловые свойства высокодисперсных порфириновых комплексов металлов, манганитов лантана и магнитных жидкостей: Автореф. дис. канд. хим. наук, Иваново, ИХР РАН, 2011.*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ ТИПА МГД-ВИХРЯ ХИЛЛА-ШАФРАНОВА К ЗАКРУТКЕ

М.С. Котельникова

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

Задача о спонтанной закрутке формулируется следующим образом [1]: может ли существовать вращательно-симметричное течение в отсутствие явных внешних источников вращения, то есть в ситуации, когда осесимметричное движение без вращения заведомо возможно? В данной работе проведено численное исследование устойчивости осесимметричного МГД-вихря Хилла-Шафранова по отношению к осесиметричным азимутальным возмущениям поля скорости. Определена область неустойчивости в зависимости от числа Рейнольдса и замагниченности. В области неустойчивости определено возникающее в результате эволюции начальных возмущений вторичное течение. В качестве тестовых моделей использовались аналитические результаты для случая идеальной жидкости и вихря с круговыми линиями тока [2].

1. *Гольдштик М.А., Жданова Е.М., Штерн В.Н. Спонтанная закрутка затопленной струи // ДАН СССР. – 1984. – Т. 277, № 4. –С.815-818.*
2. *Котельникова М.С., Луговцов Б.А. О спонтанной закрутке в осесимметричных МГД-течениях с замкнутыми линиями тока идеально проводящей жидкости // ПМТФ. – 2007. – Т. 48, № 3. – С.40-50.*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЬЦЕВОГО МГД ТЕЧЕНИЯ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРАМИ С ОТСОСОМ / ВДУВОМ В РАДИАЛЬНОМ И АЗИМУТАЛЬНОМ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В БЕЗЫНДУКЦИОННОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

В.Н. Кременецкий

Рижский Технический Университет, Рига, Латвия;
Институт физики, Латвийский Университет, Саласпилс, Латвия.

Данная работа посвящена изучению устойчивости течения между двумя соосными проницаемыми цилиндрами во внешнем комбинированном радиальном и азимутальном поле с учетом отсоса или вдува той же жидкости через цилиндрические стенки.

Эта задача имеет точное аналитическое решение в автомодельной постановке в безындукционном приближении. Постановка задачи, само решение и анализ влияния на течение интенсивности отсоса или вдува через цилиндрические стенки и магнитных полей приведены в [1].

В предлагаемой работе рассматривается как устойчивость полученного решения к малым возмущениям, так и возможность управления устойчивостью при помощи изменения скорости вращения цилиндров, интенсивности вдува жидкости через стенки, а также интенсивности как радиального, так и азимутального магнитных полей.

В работе получены кривые устойчивости для различных факторов, влияющих на устойчивость течения, приведены оценки возможности стабилизации потока изменением внешних факторов, воздействующих на течение.

1. *Kremenetsky V. MHD analogs of the Couette flow with suction/injection // Proc. 5th Int. PAMIR Conf. "Fundamental and Applied MHD", V. I, Ramatuelle, France, September 16-20, 2002.*
2. *Kolyshkin A.A. Vaillancourt R. Convective instability boundary of Couette flow between rotating porous cylinders with axial and radial flows // Phys. Fluids. – 1997. – V. 9, N. 4. – P. 910-918.*
3. *Щербинин Э.В. Теория пограничного слоя в гидродинамике и магнитной гидродинамике. Т. 1. Плоские течения. – Лаборатория ЭВТ, самиздат, Саласпилс, 2004.*
4. *Дразин Ф. Введение в теорию гидродинамической устойчивости. – М., Физматлит, 2005.*
5. *Цзя-Цзяо Л. Теория гидродинамической устойчивости. – М.: Изд. иностр. лит, 1958.*

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУРНОГО ФАКТОРА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Е.В. Крутикова[1], С.С. Канторович[1,2], Д.А. Анохин[1], А.О. Иванов[1]

[1]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия;*
[2]*Институт компьютерной физики, Штутгарт, Германия;*

Данная работа посвящена исследованию структурного фактора рассеяния полидисперсных магнитных жидкостей.

Эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов позволяют получить так называемый структурный фактор рассеяния, который является преобразованием Фурье от парной корреляционной функции системы. Таким образом, для корректной обработки экспериментальных данных по магнитным наножидкостям необходимо создание теоретической модели парной корреляционной функции и структурного фактора рассеяния.

Так как феррочастицы реальных магнитных жидкостей имеют широкое распределение по размерам, то модель обязательно должна учитывать полидисперсность. Поэтому в данной работе предложено построение парной корреляционной функции с учетом полидисперсности частиц в рамках бидисперсной аппроксимации. Проанализировано поведение первого пика структурного фактора, а именно его высота и ширина в зависимости от гранулометрического состава системы. Также проведено сравнение полученных теоретических данных с результатами компьютерного эксперимента, проведенного в Институте компьютерной физики г. Штутгарт.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-2221.2011.2, проекта Министерства образования и науки РФ №2.609.2011.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Е.В. Крутикова[1], Е.С. Минина[2], С.С. Канторович[1,2]

[1]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия;*
[2]*Институт компьютерной физики, Штутгарт, Германия;*

Данная работа посвящена изучению поведения давления полидисперсных магнитных наножидкостей как функции диполь-дипольного магнитного взаимодействия и полидисперсности. Для теоретического расчета давления магнитная наножидкость моделировалась системой бидисперсных дипольных мягких сфер с умеренным магнитным межчастичным взаимодействием [1, 2]. При вычислении давления использовался метод, основанный на диаграммном разложении магнитного дипольного взаимодействия, с последующим применением этого разложения для вычисления парной корреляционной функции и непосредственно давления. Дополнительно проводилось сравнение с данными по давлению, полученными из термодинамического подхода при интегрировании парной корреляционной функции с производной от функционала [2–4].

Для проверки адекватности построенных теоретических моделей было проведено сравнение с результатами компьютерного моделирования методом молекулярной динамики. Компьютерное моделирование проводилось также для систем с интенсивным межчастичным взаимодействием, для которого необходимо использовать другие теоретические методы. Для таких систем, однако, благодаря полученной в компьютерном эксперименте кривой давления от плотности магнитных частиц, удается методом интерполяции вычислять вириальные коэффициенты.

Проведен анализ построенных моделей и зависимости давления от изменения физических параметров магнитной наножидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-2221.2011.2, проекта Министерства образования и науки РФ №2.609.2011.

1. *Krutikova E.V., Elfimova E.A. The structure factor of polydisperse magnetic fluids – Phys. Part. Nuclei Lett. – 2001. – V. 8, N. 10. – P. 1049-1050.*
2. *Cerda J., Elfimova E., Ballenegger V., Krutikova E., Ivanov A., Holm C. Study of the structure factor anisotropy and long range correlations of ferrofluids in the dilute low-coupling regime // JMMM. – 2011. – V. 323, N. 10. – P. 1246-1253.*
3. *Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 405 с.*
4. *Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч. и др. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: ИИЛ, 1961. – 931 с.*

НЕГАУССОВСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПИРАЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ

К.М. Кузанян[1], Д.Д. Соколов[2], Т. Сакураи[3], Ю. Гао[4], Х. Жанг[4]

[1]*ИЗМИРАН, Троицк, Московская обл., Россия*
[2]*Московский государственный университет, Москва, Россия*
[3]*Национальная астрономическая обсерватория, Митака, Токио, Япония*
[4]*Национальная астрономическая обсерватория,*
Солнечная обсерватория Хуайроу, Пекин, КНР

Изучается крупномасштабное распределение спиральности магнитных полей в активных областях Солнца. В целом распределение средних спиральностей активных областей по полушариям подчинено правилу: северное полушарие — отрицательный знак, южное — положительный.

Установлено, что преимущественно величины средних спиральностей распределены по Гауссовскому закону с очень малым средним, однако всегда существует определенная часть областей, распределение которых существенным образом не укладывается в гауссовское. Как правило, эти области определяют полушарное правило знаков. Особенно много таких областей вблизи максимума солнечного цикла. Можно заметить, что вышеописанное полушарное правило наиболее определенно выражено в максимуме солнечного цикла, в то время как на фазе роста и спада имеются значительные отклонения и даже обращение знаков средних спиральностей на противоположное правилу полушарий.

Данные, полученные в ходе многолетних наблюдениях на наземных станциях Хуаироу в Китае и Митака в Японии, могут быть дополнены данными с космических станции Хиноде (Hinode-SOT/SP).

Нарушение гауссовости распределения спиральных характеристик отражает важные особенности механизма турбулентного динамо на Солнце, и должно учитываться при моделировании динамо.

О СПЕКТРАХ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ХВОСТЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

К.В. Кулагина, В.А. Орлов

Ульяновский Государственный Университет, Ульяновск, Россия

Рассматриваются спектры мощности вариаций магнитного поля ($f \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ Гц), полученные с космических аппаратов в дальнем хвосте магнитосферы Земли ($\geq 50 R_з$), представляющем уникальную природную лабораторию турбулентных магнитоплазменных течений [1]. Обращается внимание на их аналогию спектрам турбулентности, к примеру, за сферой при обтекании потоком жидкости или газа. С учетом аналогии уравнения индукции уравнению движения жидкости делается предположение об описании спектрального переноса пульсационной составляющей энергии магнитного поля $E_B = \int F_B\left(\vec{k}\right) d\vec{k}$ уравнением типа свертки [2]:

$$\frac{\partial F_B\left(\vec{k}\right)}{\partial t} = \int \left[w\left(\vec{k},\vec{g}\right) F_B\left(\vec{g}\right) - w\left(\vec{q},\vec{k}\right) F_B\left(\vec{k}\right) \right] d\vec{q} - 2\nu_B k^2 F_B\left(\vec{k}\right),$$

$$w\left(\vec{k},\vec{q}\right) = W\left(\vec{q},\vec{k}-\vec{q},F_B\left(\vec{k}-\vec{q}\right)\right),$$

что является альтернативой [3] другим методам описания свойств МГД-турбулентности как самоорганизующейся системы, связанных с формированием степенных спектров.

1. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // УФН. – 2004. – Т. 174, № 8. – С. 809-852.

2. Кулагина К.В., Орлов В.А. Об описании спектрального переноса турбулентной энергии уравнением типа свертки // Тр. XVII Зимней школы по механике сплошных сред (Электронный ресурс) – Пермь-Екатеринбург, 2011. Электрон. оптич. диск. (CD)

2. Орлов В.А. К вопросу о черном шуме в хвосте земной магнитосферы // Космос: Наука и образование: Тезисы докладов школы-семинара (Ульяновск, 6-11 ноября 2006). – Ульяновск: УлГУ, 2006. – С. 53-54.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е.В. Лахтина

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Экспериментально исследован массоперенос в магнитной жидкости при долговременном воздействии сильного гравитационного поля. Получены серии концентрационных профилей, отвечающих разным временам воздействия поля и разным концентрациям жидкости. Также проведено моделирование процесса стратификации коллоида. Сравнение экспериментальных профилей и данных моделирования проясняет понимание внутренней структуры жидкости.

Магнитная жидкость — это стабилизированный коллоидный раствор ферромагнитных частиц в немагнитном жидком носителе. Очевидно, что наиболее интересные макроскопические свойства магнитной жидкости определяются именно ее внутренней структурой (то есть наличием или отсутствием агрегатов, их количеством, формой и составом). Важной характеристикой магнитной жидкости является ее устойчивость к длительному воздействию гравитационного и магнитного полей. Чтобы получить устойчивую к расслоению жидкость необходимо удалить из нее крупные частицы и агрегаты. Обычно для этой цели применяется центрифугирование, которое инициирует в коллоиде два противоположно направленных потока частиц. Первый вызван гравитационной силой, а второй, диффузионный, – возникающей в процессе концентрационной неоднородностью. Скорость установления равновесного распределения частиц и вид промежуточных концентрационных профилей сильно зависит от дисперсионного состава жидкости. Этот факт стал отправной точкой данной работы.

Эксперименты были проведены на обычной лабораторной центрифуге. В представленных условиях эксперимента эффективное ускорение свободного падения равнялось 600 и 68 g. Пробирка с образцом помещалась в центрифугу на определенное время (от 30 минут до 60 часов). В качестве образца мы использовали магнетитовую жидкость на керосине, стабилизированную олеиновой кислотой. Начальная плотность однородной жидкости составляла 1.12 г/см^3, объемная гидродинамическая доля твердой фазы — 10%. Концентрационные профили были получены из магнитных измерений (известно, что восприимчивость магнитной жидкости однозначно зависит от концентрации). Для локальных измерений восприимчивости был разработан мост взаимной индуктивности [1] с очень узкими индукционными катушками (2 мм).

Для моделирования теория, предложенная в работе [2], была расширена на случай двухфракционной системы. Магнитная жидкость описывалась как газ свободных частиц, в который добавлено определенное количество одинаковых квазисферических агрегатов. Стерические, магнитодипольные и гидродинамические взаимодействия внутри фракции и между фракциями служили параметрами задачи, также как размер, количество агрегатов и степень упаковки частиц в агрегатах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-01-96038-р_урал_а, №10-02-96022-р_урал_а).

1. *Лахтина Е.В., Пшеничников А.Ф. //Коллоид. Жур. – 2010. – Т. 72, № 2. – С. 231.*
2. *Pshenichnikov A.F., Elfimova E.A., Ivanov A.O. //J. Chem. Phys. – 2011. – V. 134, N. 18. – P. 184508.*

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ, СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ ЛИНОЛЕВОЙ КИСЛОТОЙ

А.В. Лебедев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Магнитные жидкости или коллоидные растворы нанодисперсных магнетиков были синтезированы четыре десятка лет назад. Основная проблема, не решенная и по сегодняшний день, — это надежное описание магнитных свойств в зависимости от концентрации и температуры. Первым неплохим приближением для жидкостей небольших коцентраций может служить среднесферическая модель [1]. Для высоко концентрированных жидкостей в [2] был предложен феноменологический метод учета межчастичных взаимодействий. Тем не менее проблема требует дальнейшего исследования.

Основной помехой, ограничивающей диапазон измерений восприимчивости, является механическая блокировка частиц с понижением температуры. Температура блокировки определяется типом поверхностно-активного вещества, покрывающего частицы. Для олеиновой кислоты блокировка частиц наступает при температуре –60°C. Расширение температурного диапазона измерений и, соответственно, получение более высоких значений восприимчивости становится возможным при использовании новых сурфактантов. В частности, определенные надежды возлагаются на использование линолевой кислоты. Ранее сообщалось [3], что линолевая кислота обеспечивает понижение температуры блокировки частиц до –100°C. Но использование линолевой кислоты осложняется ее склонностью к полимеризации. По-видимому, это обусловлено наличием двух двойных связей в составе молекулы. Для устранения этой помехи было решено использовать добавки из разряда антиоксидантов. Из всего списка был выбран тринонилфенилфосфит. От остальных антиоксидантов он отличается рекордно низкой температурой плавления. Использование тринонилфенилфосфита позволило получить образцы магнитных жидкостей на основе линолевой кислоты с достаточно стабильными свойствами.

Была синтезирована серия образцов магнитных жидкостей, стабилизированных линолевой кислотой, с различным дисперсным составом. Для синтеза использовалась стандартная технология химического осаждения. В качестве базовой среды использовался изооктан – углеводород с низкой температурой плавления (-107°C). В дальнейшем синтезированный образец разделялся на фракции путем магнитной сепарации. Была измерена температурная зависимость восприимчивости для исходного образца и выделенных крупно- и мелкодисперсных фракций. Как и следовало ожидать, диапазон измерений восприимчивости для исходной жидкости и особенно мелкодисперсной фракции расширяется до -100°C и даже ниже. Совсем по-другому ведет себя восприимчивость крупнодисперсной фракции. С понижением температуры восприимчивость проходит через резко выраженный максимум, как будто в жидкости происходит механическая блокировка частиц. Очевидно, что эта блокировка не может быть объяснена ничем другим, как агрегированием частиц под действием магнитных сил. В пользу этого объяснения говорит также и тот факт, что перед резким падением восприимчивости происходит ее ускоренный рост. Очень может быть, что этот рост обусловлен возникновением крупных агрегатов с большим магнитным моментом. Таким образом, гипотеза о возможности магнитоупорядоченного состояния приобретает больше прав на жизнь.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-96022).

1. *Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Морозов К.И. Влияние межчастичных взаимодействий на статические свойства магнитных коллоидов // Магнитная гидродинамика. – 1987. – №1. – С. 37-43.*
2. *Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic fluids // J. Chem. Rhys. – 2004. – V. 121, N. 11. – P. 5455-5467.*
3. *Lebedev A.V. Low-temperature heat capacity of magnetic fluids // Magnetohydrodynamics. – 2008. – V. 44, N. 4. – P. 361-367.*

ТЕЧЕНИЕ ТЕЙЛОРА-КУЭТТА В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С РАДИАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИЕЙ ПО ПЛОТНОСТИ.

М.Г. Миндубаев

Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Для генерации и поддержания магнитного поля в условиях внешнего ядра Земли наряду с быстрым неоднородным вращением необходима меридиональная циркуляция жидкости, создаваемая конвекцией. Наиболее изученными механизмами конвекции является термоконцентрационная конвекция [1]. В последнее время большое внимание уделяется магнитовращательной неустойчивости Куэтта между неоднородно вращающимися сферами. По современным геофизическим данным угловая скорость вращения внутреннего ядра Земли отличается от скорости вращения мантии и составляет порядка 0.01-0.1град/год. В условиях быстрого вращения Земли даже при малых различиях в угловых скоростях внутреннего ядра и мантии могут создаваться механизмы существенного регулирования баланса сил в генерации магнитного поля Земли [2]. Для условий в жидком ядре Земли различие в значениях плотности на внешней и внутренней границ составляет порядка 20%. В работе [3] показано, что при учёте такого распределения, различие в моделях для сжимаемой жидкости и приближения Буссинеска становятся существенными. Частный пример учёта сжимаемости во вращающемся цилиндре во внешнем однородном магнитном поле, в котором меридиональная циркуляция создаётся неравномерностью вращения нижней границы, относительно других границ рассмотрен в [4].

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования осесимметричного течения Тейлора-Куэтта в ограниченной области с радиальной стратификацией по плотности, находящемся в однородном аксиальном магнитном поле. Приведены примеры с различными отношениями угловых скоростей и радиусами внутреннего и внешнего цилиндров.

1. *Glatzmaier C.A., Roberts P.H. An anelastic evolutionary geodynamo simulation driven by compositional and thermal convection //Physica D. – 1996. – V. 97. – P. 81-94.*
2. *Petitdemange L., Dormy E., Balbus S.A. Magnetostrophic MRI in the Earth's outer core //Geophys. Res. Lett. – 2008. – V. 35. – L15305.*
3. *Anufriev A.P., Jones C.A., Soward A.M. The Boussinesq and anelastic liquid approximations for convection in the Earth's core // Phys. Earth Planet. Inter. – 2005. – V. 152. – P. 163-190.*
4. *Миндубаев М.Г. Особенности развития двумерной конвекции во вращающейся сжимаемой проводящей жидкости // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, № 6.– С. 792-798.*

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВИРИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Е.С. Минина, С.С. Канторович

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Расчет вириальных коэффициентов [1–2] при исследовании некоторой системы является одной из фундаментальных задач. Причина этого состоит в том, что данные коэффициенты представляют собой вклады от межчастичных взаимодействий всевозможных комбинаций частиц: так второй вириальный коэффициент отображает вклад всех пар частиц системы, третий — всех троек частиц и т.д. Таким образом, знание большего числа вириальных коэффициентов приводит к более точному описанию поведения системы.

Для магнитной жидкости в тонком слое, межчастичное взаимодействие которой представлено композицией двух потенциалов: стерического и диполь-дипольного, расчет данных коэффициентов является достаточно непростой задачей. Принимая во внимание недавно полученные результаты о формировании агрегатов в тонком слое [3–4] и их отличие от трехмерных феррожидкостей, становится очевидным, что данные коэффициенты будут также существенно различаться для систем с пространственными ограничениями и без них.

В данной работе мы представляем метод расчета вириальных коэффициентов для магнитной жидкости в тонком слое. Межчастичное взаимодействие данной системы описывает потенциал диполь-дипольного взаимодействия, а стерической отталкивание — потенциал мягких сфер. Предлагаемый нами подход основан на проведении серий компьютерных симуляций в программной среде ESPResSo [5]. Здесь методом молекулярной динамики были рассчитаны давления для системы при разных плотностях и температурах. Далее по полученным данным было восстановлено уравнение состояния системы в вириальной форме и рассчитаны вириальные коэффициенты. Результаты теоретических расчетов второго и третьего вириальных коэффициентов и вычислений, проведенных на основе данных компьютерного эксперимента, находятся в хорошем согласии. Также в ходе исследований мы провели сравнительный анализ третьих вириальных коэффициентов для магнитной жидкости в тонком слое и для трехмерного образца.

1. *Гирсшфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: Изд. иностр. лит., 1961.*
2. *Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. – М.: Мир, 1978.*
3. *Dobroserdova A., Minina E., Cerda J., Holm C. Microstructure of bidisperse ferrofluids in a monolayer. – принята в печать в Solid State Phenomena в 2011 г.*
4. *Минина Е., Добросердова А., Серда Дж., Канторович С. Микроструктура бидисперсной феррожидкости в тонком слое. – направлена в печать в 2012 г.*
5. *http://espressomd.org/*

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ

С.Ю. Молоков, А.В. Педченко

Университет Ковентри, Ковентри, Великобритания

Aluminium is produced by decomposing alumina dissolved in a molten cryolite (sodium aluminium fluoride) by an electric current of 350–500 kA, which passes vertically down from the anode to the cathode. As a result of this process, a two-layer fluid system is formed with molten aluminium at the bottom of the cell and a slightly lighter cryolite at the top. Aluminium is then siphoned from the cell periodically. As cryolite is a very poor conductor, much of the energy supplied is wastefully released in the cryolite layer in the form of Joule heating. The desire to reduce the thickness of the cryolite layer (the so-called Anode-Cathode Distance), and thus to reduce the energy losses to a minimum, is limited by interfacial instabilities, which are magnetohydrodynamic (MHD)
in nature. They result from the interaction of the disturbance current with the external magnetic field, which is induced in the external circuit supplying current to the cell. This interaction creates the Lorentz force, which acts on aluminium. The resulting interfacial wave may amplify with time and may lead to the instability. Therefore, it is vitally important to understand the nature of instabilities, and to find the ways to control them.

Current status of theoretical understanding of the MHD instabilities in the cells is presented. The ways to control the instabilities by gradients of the external magnetic field and by the externally applied alternating magnetic field are discussed.

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ В ФЕРРОЖИДКОСТИ КАК ФУНКЦИИ ПАРАМЕТРА ДИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦА

А.Б. Муратова, С.С. Канторович

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Выбор геометрии образца может кардинально изменять поведение системы магнитных дипольных частиц и ее свойства. Так, например, микроструктура феррожидкости в тонком слое является более сложной и разнообразной по сравнению с микроструктурой в объеме [1–2]. Это связано с тем, что в двумерном случае энтропия играет определяющую роль, в то время как в объеме энергия системы является принципиальной при образовании агрегатов. Соответственно и коэффициенты диффузии также зависят от выбора геометрии образца и будут отличными друг от друга.

В данной работе мы представляем исследование поведения коэффициентов диффузии для феррожидкости в зависимости от параметра магнитного диполь-дипольного взаимодействия в двух разных случаях: в условиях ограниченной геометрии и без ограничений, т.е. в объеме. Наше исследование основано на проведении компьютерных экспериментов методом молекулярной динамики для феррожидкости с разными параметрами дипольного взаимодействия. Данные эксперименты проводились в программной среде ESPResSo [3]. Для данных геометрий в ходе исследования мы провели сравнительный анализ поведения коэффициентов диффузии для различных параметров магнитного диполь-дипольного взаимодействия.

1. *Dobroserdova A., Minina E., Cerda J., Holm C. Microstructure of bidisperse ferrofluids in a monolayer. – принята в печать в Solid State Phenomena в 2011 г.*
2. *Минина Е., Добросердова А., Серда Дж., Канторович С. Микроструктура бидисперсной феррожидкости в тонком слое. – направлена в печать в 2012 г.*
3. *http://espressomd.org/*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВОКРУГ ТВЕРДОГО НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

В.А. Налетова[1,2], В.А. Турков[2], Д.А. Пелевина[1,2]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*НИИ механики МГУ, Москва, Россия*

Влияние неоднородного переменного во времени магнитного поля на форму поверхности магнитной жидкости может быть использовано для создания прерывателей, клапанов
и перекачивающих устройств. Поверхность жидкости в подобных устройствах может изменяться непрерывным образом или скачкообразно. Поведение поверхности сильно намагничивающейся магнитной жидкости, содержащей цилиндр из ферромагнитного материала, для двух различных способов изменения приложенного однородного магнитного поля изучено в [1] экспериментально и теоретически.

В данной работе экспериментально и теоретически исследовано поведение поверхности раздела между слабо намагничивающейся магнитной жидкостью, содержащей ферромагнитный цилиндр, и немагнитной жидкостью в однородных постоянных и переменных с различной скоростью магнитных полях при различных способах подачи магнитной жидкости.

В эксперименте в кювету из оргстекла прямоугольного сечения, на дне которой герметично вклеено ферромагнитное тело цилиндрической формы, помещалась слабая водорастворимая магнитная жидкость. Над магнитной жидкостью помещалось более легкое трансформаторное масло. К системе прикладывалось однородное вертикальное магнитное поле, создаваемое парой катушек Гельмгольца.

Исследованы различные возможные статические формы, занимаемые объемом магнитной жидкости, при фиксированном магнитном поле. Получено, что во всем диапазоне возможных приложенных полей (от 0 до 465 Э), при постоянном поле, при различных способах подачи магнитной жидкости возможно создать устойчивые конфигурации трех типов: магнитная жидкость занимает односвязный объем покрывающий цилиндр; магнитная жидкость разделена на два независимых объема, часть поверхности цилиндра контактирует с трансформаторным маслом (при этом форма поверхности жидкости может быть не симметричной относительно вертикальной оси, магнитная жидкость может содержать в себе каверну, заполненную трансформаторным маслом); магнитная жидкость разделена на три независимых объема, один из которых — капля магнитной жидкости, удерживаемая магнитным полем и силой поверхностного натяжения на теле.

Экспериментально исследована динамика магнитной жидкости в циклически возрастающих и убывающих магнитных полях. Наблюдается гистерезис формы поверхности. Поля, при которых реализуются перечисленные выше конфигурации объема магнитной жидкости, в возрастающем поле не совпадают со значениями полей для тех же конфигураций в убывающем поле. Обнаружена существенная зависимость поведения магнитной жидкости от начальных условий и скорости изменения поля. Гистерезисные явления исчезают при увеличении скорости изменения магнитного поля.

Численно изучена статика магнитной жидкости вокруг цилиндрического концентратора в вертикальном однородном магнитном поле в безындукционном приближении с учетом поверхностного натяжения и силы тяжести для параметров задачи, совпадающих с экспериментальными. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментами.

1. *Naletova V.A., Turkov V.A., Pelevina D.A., Rozin A.V., Zimmermann K., Popp J., Zeidis I. Behavior of a free surface of a magnetic fluid containing a magnetizable cylinder // JMMM. – 2012. – V. 324. – P. 1253–1257.*

ТУРБУЛЕНТНОЕ ВИНТОВОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО НАТРИЯ В ТОЛСТОМ ТОРЕ

В.И. Носков[1], П.Г. Фрик[1,2], С.А. Денисов[1], Р.А. Степанов[1,2]

[1]*Институт механики сплошных сред, Пермь, Россия*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*

Впервые экспериментально исследуется турбулентное винтовое нестационарное МГД-течение жидкого натрия в «толстом» торе: $\Gamma = R / r = 2,25$ (R, r — радиусы осевой тора и его поперечного сечения). Течение возбуждается резким торможением заполненного натрием вращающегося тороидального канала с двумя диаметрально расположенными диверторами. Диверторы (правые) закручивают набегающий поток, придавая ему на выходе вращение правого винта. На стенки канала с диверторами (титановый сплав) намотана тороидальная катушка медного провода, создающая в канале постоянное затравочное магнитное поле.

При фиксированной температуре жидкого натрия, в эксперименте одновременно локально измеряются две компоненты (тороидальная и полоидальная) поля скорости течения (пристеночная область канала) и вектор индукции магнитного поля (на диаметре поперечного сечения, который параллелен оси вращения канала). Стабильность тормозной системы установки обеспечивает высокую воспроизводимость возбуждаемых течений.

Анализ результатов измерений показал, что исследуемое винтовое течение жидкого натрия принципиально отличается от турбулентных винтовых потоков, изученных ранее в каналах с аспектными отношениями $\Gamma \geq 2,75$ [1–9]: отличия обусловлены немонотонным нарастанием амплитуд полей на стадии возбуждения и высоким декрементом их затухания на последующих временах. Выяснилось, что пространственно-временной характер течения на стадии возбуждения качественно может быть объяснён предположением о возникновении на выходе из дивертора объёмных вихрей, которые в дальнейшем сохраняют собственный момент импульса. Гипотеза также объясняет и высокий декремент затухания возникшего течения: вращение набегающего на второй дивертор вихря противоположно его закрутке. Эволюция момента вихря по-видимому обусловлена аспектным отношением $\Gamma = R / r$ тора, поскольку характер возбуждаемого течения явно зависит от этой величины.

Близость гидродинамики воды и жидкого натрия позволяет использовать воду для моделирования натриевых потоков: в докладе демонстрируются винтовые турбулентные течения воды в тороидальных каналах с $\Gamma = 3.85; 3.81; 2.75$. Пузырьковая визуализация течений позволяет наблюдать «отражение» потока от стенки канала с возникновением и существованием геометрических структур «треугольник» ($\Gamma = 3.81$) и «квадрат» ($\Gamma = 2.75$).

1. *Denisov S.A. et al. On the possibility of laboratory realization of an unsteady MHD-dynamo // Physics-Doklady. – 1999. – V. 44. – P. 231-233.*
2. *Denisov S.A., Noskov V.I., Sukhanovskii A.N., Frick P.G. Unsteady Turbulent Spiral Flows in a Circular Channel // Fluid Dyn. – 2001. – V. 36. – P. 734-742.*
3. *Frick P. et al. Non-stationary screw flow in a toroidal channel: way to a laboratory dynamo experiment // Magnetohydrodynamics. – 2002. – V. 38. – P. 143-162.*
4. *Noskov V. et al. Magnetic field rotation in the screw gallium flow // Europ. Phys. J. B. – 2004. – V. 41. – P. 561-568.*
5. *Stepanov R. et al. Induction, helicity, and alpha effect in a toroidal screw flow of liquid gallium // Phys. Rev. E. – V. 73, N. 4. – P.046310.*
6. *Denisov S.A., Noskov V.I., Stepanov R.A., Frick P.G. Measurements of turbulent magnetic diffusivity in a liquid-gallium flow // JETP Lett. – 2008. – V. 88. – P. 167-171.*
7. *Noskov V. et al. Dynamics of a turbulent spin-down flow inside a torus // Phys. Fluids. – 2009. – V. 21, N. 4. – P. 045108.*
8. *Frick P., Noskov V., Denisov S., Stepanov R. Direct Measurement of Effective Magnetic Diffusivity in Turbulent Flow of Liquid Sodium // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105, N. 18. – P. 184502.*
9. *FrickP., Noskov V., Denisov S., Stepanov R. Turbulent viscosity and turbulent magnetic diffusivity in a decaying spin-down flow of liquid sodium // Phys. Rev. E. – 2012. – V. 85, N. 1. – P. 016303.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПЛОСКОМ СЛОЕ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

П.А. Оборин, И.В. Колесниченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

В работе исследуются течение и процесс кристаллизации в тонком слое жидкого металла. Такие исследования обусловлены в первую очередь развитием и потребностями металлургической промышленности: многие технологические процессы (производство непрерывных слитков, литье) сопровождаются кристаллизацией металла из жидкой фазы, при условии ее перемешивания. Проведение экспериментов с металлами, имеющими высокую температуру плавления, в промышленных масштабах требует больших усилий и специальной техники. Обойти это препятствие позволяет моделирование металлургических процессов в лабораторных масштабах с использованием специальных металлических сплавов с низкой температурой плавления. В данной работе процесс кристаллизации изучается на галлиевом сплаве, который при комнатной температуре находится в жидком состоянии. Для определения положения границы раздела фаз и картины течения использовался ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА).

Эксперименты показали, что эволюция положения границы кристаллизации описывается корневым законом. Наложение перемешивающего течения не изменяет вид этого закона. В большинстве случаев в центральной области плоскости слоя положение границы кристаллизации определяется с хорошей точностью. Темп кристаллизации различается для положения, получаемого каждым датчиком УДА. При этом темп кристаллизации спадает в ходе процесса. С увеличением интенсивности перемешивающего течения, темп кристаллизации возрастает. При этом граница быстро выходит на некоторое стационарное состояние. Следует отметить, что на данном этапе работы мы изучаем течения умеренной интенсивности, поэтому индуцированный ток в слое подогревает его за счет Джоулевого механизма незначительно. Если проследить эволюцию фронта кристаллизации и вихрей во времени, то видно, что первоначально из-за ограниченного объема (индуктор покрывает практически всю площадь жидкой фазы) течение в кювете двухвихревое. С увеличением ширины жидкой фазы течение переходит в четырехвихревое.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №10-08-96048_Урал).

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ, БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

П.А. Оборин[1], С.Ю. Хрипченко[1,2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Многие технологические процессы в металлургии сопровождаются перемешиванием расплавленного металла. В таких процессах, как приготовление сплавов, литье при производстве слитков, перемешивание является определяющим фактором, влияющим на качество готовых сплавов и изделий.

В настоящее время перемешивание сплавов в ваннах алюминиевых печей бегущим магнитным полем, является востребованным и распространенным способом. Однако существующие перемешиватели имеют большое энергопотребление и невысокий КПД, помимо этого остается вопрос об эффективности перемешивания производимого такими устройствами.

В условиях реального производства проверять эффективность используемых режимов перемешивания сложно и экономически невыгодно. С появлением современных и приборов и развитием вычислительных мощностей появилась возможность лабораторного моделирования турбулентных процессов. Адекватная математическая модель в совокупности с численными расчетами может позволить выбрать из широкого диапазона параметров наилучшие.

В работе рассматривается процесс перемешивания в прямоугольной полости, осуществляемый бегущим магнитным полем от индуктора расположенным под дном полости. Исследуется процесс переноса пассивной примеси в объеме жидкого металла, а также влияние различных параметров и их комплексов на интенсивность течения и распределение примеси в объеме металла.

Цель работы теоретическое и экспериментальное исследование процесса распределения примеси в объеме жидкого металла при перемешивании. Нахождение условий для получения однородного сплава и подбор комплекса параметров характеризующих процесс перемешивания, путем сравнения результатов математических расчетов и экспериментов.

Работа включает в себя численный расчет и физический эксперимент, в котором производится проверка результатов численного моделирования на лабораторной модели. Параметры численной модели подобраны таким образом, чтобы соответствовать существующей физической модели.

Работа выполнена при поддержке субсидии проекта Международной исследовательской группы «Магнитогидродинамическое перемешивание жидкого металла и его воздействие на структуру затвердевающих сплавов».

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКУЮ И ТЕПЛОВУЮ

В.А. Орлов, К.В. Паксютов

Ульяновский Государственный Университет, Ульяновск, Россия

Индукционный нагрев, имея ряд неоспоримых преимуществ перед традиционными способами нагрева, входит в практику литейного производства и применяется в исследованиях, связанных с расплавами металлов, в том числе, где имеют место МГД-процессы. Вместе с тем остается широкое поле деятельности для совершенствования соответствующего оборудования. Одним из участков этого «поля» является проблема выбора и удержания режима максимальной полезной нагрузки генератора электрических колебаний. В нашем генераторе, составляющем основную часть макета установки, находящейся на кафедре радиофизики и электроники, данная проблема решена оригинальным способом.

Построены математические схемотехнические модели нескольких вариантов такого генератора в программе LtspiceIV, для чего была написана поведенческая модель (behavioral model) микросхемы CD4046. Результаты расчета моделей генераторов с ФАПЧ и автогенераторов с уставками полностью совпадают с измеренными значениями токов и напряжений экспериментальных макетов.

В качестве объекта воздействия («рабочего тела») данного генератора может быть использована также и плазма, и жидкие электролиты. Кроме того, при замене индукционной нагрузки на емкостную этот генератор можно использовать для возбуждения мощного ультразвука и прежде всего — в жидких средах. Впрочем, ультразвук в проводящей жидкости с помощью такого генератора можно возбудить и МГД-способом — пропуская через нее электрический ток [1]. К примеру, такой способ генерации ультразвука в жидкости, возможно, был бы интересен при отливе пористых металлов, получаемых при застывании расплава в присутствии силовых полей.

Эффективность и простота реализации таких генераторов открывают перспективу постройки установок с их использованием широкомасштабно в лабораториях даже с малым финансированием для исследований, в том числе и в области МГД.

1. *Бирзвалк Ю.А. Магнитная гидродинамика. – М.: Знание, 1979. – 64 с.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОЛЯ СКОРОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.М. Павлинов[1], И.В. Колесниченко[2], Р.И. Халилов[2], S. Miralles[3], N. Plihon[3]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[3]*Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de Lyon, LYON Cedex 07, France*

Перед нами стояла задача исследовать турбулентный след в галлиевом сплаве за цилиндрическим препятствием в присутствии постоянного магнитного поля, ориентированного перпендикулярно направлению течения. Цилиндрический замкнутый канал подключён к регулируемому насосу бегущего поля и содержит вентили, позволяющие варьировать гидросопротивление канала. Крепления позволяют помещать цилиндры различного диаметра (8, 10, 12, 14, 16 мм) от стенки до стенки, симметрично в плоскости сечения трубы. Канал также оснащён теплообменником с термопарами для поддержания постоянной температуры галлиевого сплава и датчиком среднего расхода.

Измерение характеристик течения осуществлялось с помощью двух типов датчиков: двухкомпонентного кондукционного датчика скорости (описан в работе [1]) и ультразвукового доплеровского анемометра. Кондукционный датчик скорости чувствителен к внешним магнитным полям, поэтому он был вынесен за пределы сильного поля электромагнита. Для уменьшения влияния индукционных токов на показания кондукционного датчика этот отрезок канала был зашунтирован. Для фильтрации гармоник питающей сети был использован цифровой фильтр. После фильтрации набор данных описывает процесс, близкий к стохастическому.

В отсутствие постоянного магнитного поля спектральные плотности пульсаций компонент скорости имеют стандартный Колмогоровский вид для всех диаметров цилиндров. При наложении сильного магнитного поля наблюдается явно иная перекачка энергии между масштабами, как следствие взаимодействия потока проводящей жидкости с полем. Для частот в пределах единиц Гц наблюдается немонотонная зависимость величины пульсаций компонент скорости от индукции внешнего магнитного поля: при увеличении индукции от 0 до 0.5 Тл пульсации в этом частотном диапазоне затухают, а при дальнейшем увеличении — растут. Поведение потока на первом интервале согласуется с результатами, описанными в работах [2, 3]. Ожидалась двумеризация вихрей и переориентация их в плоскости, параллельной направлению постоянного магнитного поля, что и наблюдается при слабых полях. Но при дальнейшем увеличении индукции магнитного поля эта зависимость теряется, что можно объяснить явлениями, происходящими в переходном слое между областью
с постоянным магнитным полем и вне него. Также наблюдается падение средней скорости с ростом индукции магнитного поля для всех цилиндров.

1. *Noskov V., Stepanov R., Denisov S. et al. Dynamics of a turbulent spin-down flow in-side a torus // Phys. Fluids. – 2009. – V. 21, N. 4.*
2. *Брановер Г.Г., Гельфгат Ю.М., Турунтаев С.В., Цинобер А.Б. Влияние поперечного магнитного поля на возмущения скорости за обтекаемым электролитом круглым цилиндром // Магнитная гидродинамика. – 1969. – V. 3. – P. 63.*
3. *Лиелаусис О.А., Цинобер А.Б., Штерн А.Г. О влиянии поперечного магнитного поля на характер обтекания тел жидким металлом // Изв. АН Латв. ССР. – 1963. – V. 5. – P. 73.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ

А.В. Педченко, С. Ю. Молоков

Университет Ковентри, Ковентри, Великобритания

Aluminium is produced by decomposing alumina dissolved in a molten cryolite (sodium aluminium fluoride) by an electric current of 350–500 kA, which passes vertically down from the anode to the cathode. As a result of this process, a two-layer fluid system is formed with molten aluminium at the bottom of the cell and a slightly lighter electrolyte (cryolite melt) at the top. As the electrolyte is a very poor conductor it is desirable to reduce its thickness and thus to reduce the Joule heating losses to a minimum. The limiting factor for reducing the electrolyte thickness are interfacial instabilities of the liquid aluminium surface, which are magnetohydrodynamic (MHD) in nature. They result from the interaction of the disturbance current with the external magnetic field, which is induced in the external circuit supplying current to the cell. This interaction creates the Lorentz force, which acts on aluminium. The resulting interfacial wave may amplify with time and may lead to the instability. Therefore, it is vitally important to understand the nature of instabilities, and to find the ways to control them.

We present the experimental model of this interfacial instability which allows to study the phenomena in laboratory conditions using room-temperature liquid metal facility.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕНОС КРУПНОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА ИНДУЦИРОВАННЫЙ СПИРАЛЬНОСТЬЮ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ

В.В. Пипин

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

Рассмотрен эффект турбулентного переноса крупномасштабного магнитного поля Солнца, индуцированный спиральность конвективных течений и неоднородным вращением конвективной зоны. Данный эффект был предложен ранее в [1] и после рассматривался в [2]. Суть явления состоит в том, что спиральность и неоднородное вращение создают эффективный перенос магнитного поля в направлении крупномасштабного вектора завихренности, обусловленного неоднородным вращением турбулентной среды. Известно, что влияние спиральности конвективных течений на эволюцию магнитных полей сильно зависят от параметров влияния глобального вращения на конвекцию. Взаимосвязь кинетической спиральности с глобальным вращением, определяется числом Кориолиса, описывающим отношение характерных времен оборота конвективных ячеек к времени оборота Солнца.

В докладе мы рассмотрим результаты расчетов данного эффекта переноса для режимов, включающих медленное и быстрое вращение (малое и большое число Кориолиса), а также рассмотрим приложения данного эффекта в моделях солнечного динамо.

1. *Pipin V.V. The mean electro-motive force and current helicity under the influence of rotation, magnetic field and shear // GAFD. – 2008. – V. 102. – P. 21.*
2. *Rogachevskii I., Kleeorin N., Kaepylae P.J. Brandenburg, A. Pumping velocity in homogeneous helical turbulence with shear // Phys. Rev. E. – 2011. – V. 84. – P. 6314.*

АКУСТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ. ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИМЕНЕНИЕ

В.М. Полунин

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Доклад содержит информацию, раскрывающую уникальную физическую природу акустомагнитного эффекта в магнитной жидкости, методику и результаты его экспериментального осуществления. Обстоятельно обсуждаются два примера практического использования данного эффекта: «Акустомагнитная спектроскопия» и «Акустогранулометрия».

Если плоская звуковая волна распространяется в магнитной жидкости (МЖ) по оси OX параллельно вектору напряженности магнитного поля, т.е. $\boldsymbol{H} \parallel \boldsymbol{k}$, то в силу уравнения Максвелла $div\boldsymbol{B} = 0$ приращение намагниченности влечет за собой приращение напряженности магнитного поля:

$$\delta H = -\delta M \ .$$

При взаимноортогональном расположении векторов $\boldsymbol{H} \perp \boldsymbol{k}$ звуковая волна обусловливает возмущение магнитной индукции, при этом возмущение размагничивающего поля отсутствует — $\delta H = 0$.

Оценка колебаний намагниченности выполнена в предположении, что амплитуда деформации в звуковой волне составляет 10^{-4}, соответственно интенсивность $J = 10^4$ Вт/м^2. При этом для амплитуды колебаний $\left(\frac{\Delta M}{M_0}\right)_0$ и $\left(\frac{\Delta M}{M_0}\right)_\infty$ получим $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ и10^{-4}.

Приводится расчет динамического размагничивающего фактора для случая стоячей звуковой волны в магнитной жидкости, заполняющей трубку и намагниченной в ортогональном к оси трубки магнитном поле.

Весьма важным электромагнитным эффектом, вызванным распространением плоской звуковой волны в намагниченной жидкости, является индуцирование переменного электрического поля и ЭДС в проводящем контуре, который мы называем акустомагнитным эффектом в магнитной жидкости. Показано, что при интенсивности звука 10^5 Вт/м^2 амплитуда скорости смещения в звуковой волне $\omega u_m \approx 0{,}35$. При h=10^{-2} м, N_k =10, M_S =30 кА/м получим e_m =$2{,}5 \cdot 10^{-3}$ В. Данная оценка подтверждается прямыми экспериментальными исследованиями.

Данные экспериментальных исследований мод упругих колебаний в системе жидкость – цилиндрическая оболочка, имевшиеся в литературе, немногочисленны и несистематичны. Поэтому не представляется возможным выбор наиболее адекватной из большого количества существующих теорий. Отсюда вытекает задача проведения такого рода исследований на новой методической основе. В работах В.М. Полунина и И.Е. Дмитриева приведены результаты экспериментального исследования дисперсии скорости звука в системе магнитная жидкость – цилиндрическая оболочка на основе метода акустомагнитной идентификации и дано сравнение с ними выводов существующих модельных теорий.

В основе рассматриваемого метода акустогранулометрии лежит анализ полевой зависимости амплитуды ЭДС, индуцируемой в контуре за счет акустомагнитного эффекта. Получены формулы для расчета магнитного момента наночастиц дисперсной фазы. Показано удовлетворительное согласие значений измеряемых параметров с результатами, полученными известными методами.

ВИБРАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТЬЮ, УДЕРЖИВАЕМОЙ СИЛАМИ ЛЕВИТАЦИИ

В.М. Полунин, М.Л. Боев, Мьо Мин Тан, Г.Т. Сычев

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

В статье рассматриваются упругие свойства системы: магнитная жидкость (МЖ) в трубке с донышком — воздушная полость, зависание которой и транспорт вдоль столбика МЖ обеспечиваются силами магнитной левитации. Для осуществления левитационного эффекта используется намагниченный вдоль оси кольцевой магнит, одетый на трубку и перемещающийся вдоль нее. При этом воздушная полость образуется путем захвата порции воздуха с открытой поверхности МЖ неоднородным магнитным полем по мере приближения кольцевого магнита к свободной поверхности МЖ сверху.

В опытах используется жестко закрепленная стеклянная трубка, частично заполненная магнитной жидкостью. Закрепленный на кинематическом узле катетометра кольцевой магнит опускается вниз по трубке, при этом оси кольцевого магнита и трубки совмещены между собой.

Вначале эксперимента свободная поверхность МЖ имеет плоскую горизонтальную форму. С приближением магнита к свободной поверхности жидкости ее поверхность сначала принимает вогнутую форму, а затем по мере приближения активной зоны магнитного поля пондеромоторные силы, прижимая жидкость к стенке трубки одновременно втягивают ее в область максимального поля, в результате чего образуется кольцо в плоскости симметрии магнита. При дальнейшем опускании магнита пондеромоторные силы значительно превосходят силу тяжести, благодаря чему магнитожидкостное кольцо утолщается, а затем перекрывает сечение трубки. Под перемычкой образуется изолированная газовая полость, перекрывающая сечение трубки. Далее толщина перемычки растет за счет перетекания жидкости снизу, а воздушная полость под действием сил левитации проталкивается вниз.

В число интересующих нас характеристик системы входят отражательные способности газовой полости и упругие свойства колебательной системы, в качестве инерционного элемента которой служит столбик магнитной жидкости над зависшей газовой полостью, а в качестве упругости — упругость воздушной полости. Диссипативные свойства исследованной колебательной системы в основном формируются тремя физическими механизмами: механизмом вязкого течения пристеночных слоев МЖ [1, 2]; механизмом межфазного теплообмена [3, 4]; и механизмом излучения упругих колебаний в элементы конструкции и окружающую среду [5].

Выполненные оценки показали, что механизмы вязкого течения пристеночных слоев МЖ и межфазного теплообмена могут дать существенный вклад в диссипацию упругой энергии системы.

Полученные результаты могут найти применение при создании демпфирующих устройств, датчиков вибраций, толчков и ускорений.

1. *Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 336 с.*
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – Т. 6. – 736 с.*
3. *Devin C. Survey of thermal, radiation and viscous demping of pulsating air bubbles in water // J. Acoust. Soc. Amer. – 1959. – V. 31, N. 12. – P. 1654-1667.*
4. *Чабан И.А. О затухании колебаний газового пузырька в жидкости, связанном с теплообменом // Акуст. Журн. – 1989. – Т. 35, № 1. – С. 182-183.*
5. *Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высш. шк., 1978. – 448 с.*

ОБ ОЦЕНКЕ РАЗМЕРОВ НАИБОЛЕЕ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

В.М. Полунин, А.М. Стороженко

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Предложена методика оценки магнитных и геометрических параметров частиц, составляющих мелкую дисперсную фракцию магнитной жидкости (МЖ) на основе комплексного использования результатов магнитогранулометрических и акустогранулометрических измерений. Известная концентрационная модель акустомагнитного эффекта (АМЭ) учитывает наряду с колебаниями концентрации магнитных наночастиц колебания температуры МЖ в адиабатной звуковой волне. Кроме того, при условии ограниченности боковой поверхности звукового пучка и в зависимости от взаимной ориентации волнового вектора и вектора напряженности магнитного поля возникает специфическое для данного случая «динамическое» размагничивающее поле [1].

Доминантным среди механизмов АМЭ является механизм колебаний концентрации магнитных наночастиц в жидкости-носителе под действием звуковой волны — функция Ланжевена. Теоретический анализ показывает, что замедление роста относительной амплитуды АМЭ за счет динамического размагничивающего поля с увеличением напряженности магнитного поля ослабевает и становится незначительным по сравнению с замедлением, привносимым тепловыми колебаниями. В окрестности магнитного насыщения (т.е. для $H\to\infty$) вклад двух последних факторов в механизм АМЭ при одновременном их действии представляется функцией [2]:

$$Y_+(H)=\frac{qc^2k_0T}{C_p\mu_0m_*}\cdot\frac{1}{H}+\frac{N_dM_Sk_0T}{\mu_0m_*}\cdot\frac{1}{H^2}\,, \qquad (1)$$

где q — температурный коэффициент расширения, c — скорость звука в МЖ, k_0 — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; μ_0 — магнитная постоянная, m_* — магнитный момент частицы МЖ, N_d — динамический размагничивающий фактор, M_S — намагниченность насыщения МЖ.

Чтобы экспериментально показать суммарный вклад в возмущение намагниченности МЖ тепловых колебаний и динамического размагничивающего поля, была построена «разностная» кривая $Y_+^{(e)}(H)$. Ее построение осуществляется путем вычитания значений относительной амплитуды АМЭ из относительных значений намагниченности МЖ в магнитных полях одинаковой напряженности.

Основой методики оценки магнитных моментов мелких наночастиц МЖ является нахождение тангенса угла наклона α отрезка прямой $Y_+^{(e)}(H^{-1})$ в окрестности магнитного насыщения. Теоретически, как это следует из формулы (1), $\mathrm{tg}\alpha = qc^2k_0T/(C_p\mu_0m_*)$. Приравнивая это выражение к результату аппроксимации экспериментальной зависимости $Y_+^{(e)}(H^{-1})$, можем вычислить магнитный момент частиц мелкой фракции МЖ. При $H \geq 300$ кА/м для исследуемого образца было получено: $\mathrm{tg}\alpha = 13400$, что выполняется при $m_* = 0{,}7\cdot10^{-19}$ А·м^2. Откуда следует оценка минимального размера однодоменных частиц дисперсной фазы исследуемой МЖ, полученная по предложенной методике: d = 6,5 нм.

Преимущество данной методики перед методикой, основанной на анализе кривой намагничивания, состоит в том, что в последней малые приращения намагниченности за счет выстраивания мелких частиц в сильных полях выявляются на фоне значительно превосходящей их намагниченности, привносимой частицами крупных и средних размеров. Следовательно, в насыщающих полях магнитогранулометрическая методика выявления мелких частиц МЖ недостаточно эффективна.

Исследования выполнены при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 14.740.11.1160).

1. *Полунин В.М., Ряполов П.А., Стороженко А.М. и др. Акустоструктурный анализ нанодисперсной магнитной жидкости // Известия высш. учебн. заведений. Физика. – Томск, 2011. – № 1. – С. 10-15.*
2. *Полунин В.М., Стороженко А.М. Взаимодействие физических полей в акустомагнитном эффекте // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 2. – С. 215-221.*

МАЛОМОДОВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ДИНАМО В СЛУЧАЕ ДИПОЛЬНОЙ И КВАДРУПОЛЬНОЙ СИММЕТРИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Е.П. Попова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Считается, что 11-летний цикл солнечной активности реализуется за счет работы механизма динамо в конвективной зоне Солнца, который основан на совместном действии альфа-эффекта и дифференциального вращения. Вполне возможно, что этот механизм действует и в других небесных телах, включая Землю и галактики. Математическое описание работы динамо описывается громоздкими системами дифференциальных уравнений в частных производных, решение которых возможно, но не исчерпывает проблему полностью. В такие системы уравнений в качестве коэффициентов входят величины, распределение которых по небесному телу плохо известны. Кроме того, при помощи прямого численного моделирования сложно дать объяснение различных явлений. В подобных случаях удобнее пользоваться упрощенными моделями, которые позволяют прояснить физику явлений.

Один из способов получения упрощенной модели генерации магнитного поля состоит в следующем. Предполагается, что возбуждаемое магнитное поле можно описать сравнительно небольшим числом параметров и для его качественного описания уравнения динамо можно заменить динамической системой не очень высокого порядка. Такой метод был использован в [1, 2] для исследования динамо Паркера в случае дипольной симметрии магнитного поля. На основе этого метода в [1, 2] получена динамическая система, которая правильно описывает многие известные черты циклической солнечной активности и в ряде случаев показывает, с чем связаны эти черты.

В данной работе построена и исследована динамическая система для случая квадрупольной симметрии магнитного поля, а также динамическая система для случая, когда магнитное поле имеет дипольные и квадрупольные компоненты. Построены широтно-временные распределения полоидального и тороидального полей. Найдены условия, при которых реализуются различные режимы генерации магнитного поля.

1. *Соколов Д.Д., Нефедов С.Н. Маломодовое приближение в задаче звездного динамо // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – С. 195-204.*
2. *Нефедов С.Н., Соколов Д.Д., Нелинейная маломодовая модель динамо Паркер // Астрон. Ж. – Т. 87, № 3. – С. 278 – 285.*

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ, В КОТОРЫХ ЧАСТИЦЫ ОБЛАДАЮТ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ, СМЕЩЕННЫМ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА МАСС

Т.А. Прокопьева, С.С. Канторович

Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

На базе теории среднего поля [1], используемой для описания магнитных свойств феррожидкостей, мы разработали статистическую модель, позволяющую рассчитать намагниченность и начальную восприимчивость феррожидкости со смещенными диполями. Такая феррожидкость моделируется системой частиц, в которых магнитный момент смещен относительно центра масс по направлению к поверхности частицы.

Магнитные характеристики получены путем разложения в ряд специального потенциала взаимодействия, выведенного для смещенных диполей [2]. Показано влияние величины смещения на магнитные свойства системы. Полученные характеристики системы могут использоваться для описания различных систем с анизотропным магнитным взаимодействием.

1. *Ivanov A., Kuznetsova O. Magnetic properties of dense ferrofluids: an influence of interparticle correlations // Phys. Rev. E. – 2001. – C. 041405-01-12.*
2. *Kantorovich S., Weeber R., Cerda J. Holm Ch. Ferrofluids with shifted dipoles: ground state structures // Soft Matter. – 2011. – P. 5217.*

О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ С СИЛЬНЫМИ МАГНИТОДИПОЛЬНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

А.Ф. Пшеничников

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Обсуждается проблема фазовых переходов первого и второго рода в дипольных системах с сильными межчастичными взаимодействиями. Типичным примером такой системы является концентрированная магнитная жидкость с относительно крупными (12-15 нм) частицами. Главной особенностью этой системы является наличие анизотропного диполь-дипольного потенциала, оказывающего ориентирующее влияние на магнитные моменты соседних частиц. Это влияние приводит к многократному росту начальной восприимчивости и (потенциально) способно выстроить все магнитные моменту вдоль некоторого направления, что будет означать фазовый переход в «ферромагнитное» состояние. Вместе с тем, усреднение магнитодипольных взаимодействий по ориентациям магнитных моментов приводит к эффективному притяжению между диполями. Это означает, что при достаточно низких температурах, когда энергия притяжения превысит энергию теплового движения, должна начаться конденсация частиц в некоторую плотно упакованную «жидкую» фазу (переход первого рода).

К настоящему времени наиболее подробно и обстоятельно исследован фазовый переход первого рода — расслоение магнитной жидкости на слабо- и сильноконцентрированную фазы. Концентрированная фаза представлена обычно так называемыми капельными агрегатами — объектами с характерным размером в несколько десятков микрон. На границе между капельными агрегатами и коллоидным раствором существует поверхностное натяжение. Оно приводит к тому, что в отсутствие внешних полей агрегат приобретает сферическую форму. Форма, близкая к сферической сохраняется и в слабом магнитном поле. Фазовый переход типа «газ – жидкость» многократно наблюдался в лабораторных экспериментах и его существование не вызывает сомнений. Вопрос только в том, являются ли магнитодипольные взаимодействия достаточным условием для такого перехода, или необходим какой-нибудь дополнительный потенциал притяжения. Например, потенциал Ван-дер-Ваальса. Здесь мнения исследователей расходятся принципиально.

К настоящему времени нет никаких экспериментальных данных, которые бы однозначно указывали на существование магнитоупорядоченного состояния в дипольной системе. Тем не менее, вопрос о переходе магнитной жидкости в магнитоупорядояенное «ферромагнитное» состояние обсуждается достаточно интенсивно. Одна из главных причин этого связана с гипотезой о применимости к магнитным жидкостям модели Вейсса эффективного поля. Будучи наиболее простой, эта модель стала использоваться для описания свойств магнитных жидкостей сразу же, как только появилась потребность в учете межчастичных взаимодействий. Она широко применялась в работах Бибика, Цеберса, Диканского, Холмса, Накатани и др. Во всех этих работах применимость модели Вейсса к магнитным жидкостям постулировалась и, как следствие, постулировалась возможность фазового перехода магнитной жидкости в магнитоупорядоченное состояние. Аналитические модели, не связанные прямо или косвенно с моделью Вейсса, предсказывают отсутствие магнитного порядка. Главный недостаток таких моделей – малая область применимости. Характерная энергия магнитодипольных взаимодействий, соответствующая гипотетическому переходу, находится за пределами применимости этих моделей, поэтому к их предсказаниям необходимо относиться с известной осторожностью. Решающую роль в дискуссии могли бы сыграть результаты численного моделирования методами Монте-Карло или методами молекулярной динамики. К сожалению, результаты численного моделирования также оказываются противоречивыми и зависят от способа учета размагничивающих полей и перехода к термодинамическому пределу. Формально вопрос остается открытым.

В настоящей работе приводятся новые данные, касающейся этой дискуссии.

РАВНОВЕСНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ФЕРРОКОЛОИДОВ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.Ф. Пшеничников[1,2], А.А. Кузнецов[2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*

Работа посвящена численному моделированию систем с сильными диполь-дипольными и стерическими взаимодействиями. Основное внимание обращено на равновесные свойства магнитных жидкостей и дискуссионную проблему фазового перехода второго рода типа «парамагнетик – ферромагнетик». Несмотря на то, что эта проблема активно обсуждается с восьмидесятых годов прошлого века, она не решена окончательно до сих пор, а результаты многочисленных работ явно зависят от примененного авторами способа решения [1, 2]. Основным способом исследования проблемы остаётся численное моделирование методами Монте-Карло и молекулярной динамики, так как в этом случае нет формальных ограничений на величину безразмерных параметров. Экспериментально фазовый переход второго рода не наблюдался, а большинство аналитических моделей либо основаны на эффективном поле Вейсса (которое обеспечивает фазовый переход автоматически), либо используют разложение по малому параметру (концентрации или энергии межчастичных взаимодействий) с дальнейшей экстраполяцией результатов в область больших его значений. Результаты численных экспериментов, однако, тоже противоречивы (к примеру, переход в «ферромагнитное» состояние наблюдался в [3], но отсутствовал в [4, 5]). Главные проблемы при численном моделировании дипольных систем — это достижение термодинамического предела и исключение размагничивающих полей [5]. В работах, где был обнаружен «ферромагнитный» переход, для преодоления этих проблем использовались периодические граничные условия в сочетании с техникой суммирования по Эвальду. Возможно, именно это обстоятельство и является причиной артефакта?

Как было показано в [3], суммирование по Эвальду не приводит к качественным изменениям в результатах моделирования. В настоящей работе впервые использован новый алгоритм вычисления равновесной намагниченности (модель пермеаметра), позволяющая устранить размагничивающие поля без наложения на систему периодических граничных условий. Проведены эксперименты в широком диапазоне концентрации частиц и энергии магнитодипольных взаимодействий. Для области умеренных параметров агрегирования предсказания модели совпадают с многократно подтверждёнными результатами других работ. В области сильных магнитодипольных взаимодействий, представляющей собой предмет дискуссий, перехода в упорядоченное состояние не обнаружено. Таким образом, получен серьезный довод в пользу того, что периодические граничные условия являются причиной артефакта – ложного фазового перехода в «ферромагнитное» состояние.

1. *Morozov K.I. // J. Chem. Phys. – 2003. – V. 119, N. 24. – P. 13024.*
2. *Ivanov A.O. // Phys. Rev. E. – 2003. – V. 68, N. 1. – 011503.*
3. *Пшеничников А.Ф., Разумков А.В. // Труды XVI Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2009. – С. 4.*
4. *Пшеничников А.Ф., Мехоношин В.В. // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 72, №. 4. – С. 261.*
5. *Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V. // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – V. 213. – P. 357.*

МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ С АНИЗОТРОПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Е.С. Пьянзина[1], С.С. Канторович[1,2]

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия*
[2]*Институт компьютерной физики, Екатеринбург, Германия*

В последнее время достаточно большое число исследований посвящено магнитным жидкостям, частицы которых обладают различной анизотропией. Рассматриваются магнитные частицы, имеющие форму, отличную от сферической (наностержни, наноэллипсоиды), а также обладающие сдвинутым магнитным моментом (см., например, [1–4]). Такая анизотропия формы и положения магнитного момента приводит к тому, что данные магнитные жидкости обладают новыми необычными свойствами. При большом числе экспериментальных работ в данной области, теоретическое изучение представлено небольшим количеством исследований.

В настоящей работе мы представляем теоретическую модель, позволяющую изучить влияния формы магнитных частиц и положения их магнитного момента на основное состояние системы, а также некоторые термодинамические свойства. Например, для основного состояния системы из наноэллипсоидов было показано, что критическое число частиц, при котором происходит переход между цепочкой и кольцом (структурами основного состояния для системы сферических частиц [5]) зависит от соотношений между полуосями эллипсоида.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.609.2011).

1. *Ganzenmueller G. Camp P.J. Vapor-liquid coexistence in fluids of charged hard dumbbells // J. Chem. Phys. – 2007. – V. 126. – P. 191104–191107.*
2. *Philipse A.P., van Bruggen M.P.B., Pathmamanohara P. Magnetic silica dispersions: preparation and stability of surface-modified silica particles with a magnetic core // Langmuir. – 1994. – V. 10. – P. 92–99.*
3. *Vereda F., Vicente J. Hidalgo-Alvarez R. Physical Properties of Elongated Magnetic Particles: Magnetization and Friction Coefficient Anisotropies // Chem. Phys. Chem. – 2009. – V. 10. – P. 1165-1179.*
4. *Baraban L., Makarov D., Albrecht M., Rivier N., Leiderer P., Erbe A. Frustration-induced magic number clusters of colloidal magnetic particles // Phys. Rev. E. – 2008. – V. 77. – P. 031407–031412.*
5. *Prokopieva T., Danilov V., Kantorovich S., Holm C. Ground state structures in ferrofluid monolayers // Phys. Rev. E. – 2009. – V. 80. – P. 031404-01-031404-13.*

ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО МАСЛА «АЛКАРЕН»

А.Г. Рамазанова[1], В.В. Королев[1], В.И. Яшкова[1,2], О.В. Балмасова[1]

[1]*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, Иваново, Россия*
[2]*ООО «НаноМагнетик», Иваново, Россия*

Состав и свойства магнитных жидкостей обуславливают возможность их практического применения в различных областях науки и техники. Благодаря невероятному сочетанию высокой намагниченности и текучести магнитные жидкости могут использоваться в качестве рабочего тела в технических устройствах различного назначения: в магнитных холодильных устройствах, магнитожидкостных герметизаторах, датчиках угла наклона и в качестве магнитных смазок в узлах трения и т.д. В последнее время ведутся интенсивные исследования по разработке и созданию широкого спектра многофункциональных магнитных жидкостей на различных основах. Создаются магнитные жидкости обладающие инертностью по отношению к агрессивным средам, высокой термостабильностью, намагниченностью насыщения, высокой гидрофобностью, текучестью, низкой летучестью, вязкостью, электропроводностью и низким коэффициентом трения. В работе проведена разработка условий направленного синтеза многофункциональных магнитных жидкостей. Выбраны оптимальные условия синтеза магнитной фазы — магнетита, проведен расчет количественного соотношения магнитная фаза — стабилизатор. Выполнен направленный синтез магнитной жидкости на основе синтетического углеводородного масла «Алкарен» определены ее физико-химические характеристики.

Были синтезированы 4 образца магнитных жидкостей на основе нового синтетического углеводородного высоковакуумного масла «Алкарен», которое обладает низкой упругостью пара, высокой термоокислительной стойкостью, имеет хорошие триботехнические характеристики, не склонно к гидролизу под действием влаги, воздуха, инертно, нетоксично. Было проведено исследование физико–химических свойств синтезированных магнитных жидкостей (объемной концентрации магнитной фазы, плотности, динамической вязкости, намагниченности насыщения, термостабильности). Анализ термической стабильности образцов магнитной жидкости был проведен в интервале температур $+20 \div +250^0$C на дериватографе TG 209 F1 (Германия). На основании кривой TG было заключено, что в образцах убыль массы при 250^0C не превышает 4%, что свидетельствует о высокой термостабильности образцов [1]. Было установлено, что убыль массы образца обусловлена испарением дисперсионной среды, т.к. изменений в химической структуре компонентов магнитной жидкости не происходило. Полученные зависимости динамической вязкости от скорости сдвига синтезированных магнитных жидкостей различной концентрацией магнитной фазы имеют ньютоновский вид при концентрациях твёрдой фазы вплоть до 50 % (вес.). Однако при возрастании концентрации вязкость уменьшается с ростом напряжения и скорости деформации, что характерно для структурированных систем.

1. *Павлова С.-С.А., Журавлева И.В., Толчинский Ю.И. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений (Методы аналитической химии). – М.: Химия, 1983. – С. 9.*

ВЛИЯНИЕ БЫСТРО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Е.С. Садилов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

В данном докладе рассматриваются результаты изучения влияния быстро вращающегося горизонтального магнитного поля на устойчивость слабонадкритических конвективных течений в горизонтальном слое электропроводной жидкости. Вращение поля происходит вокруг вертикальной оси. Границы слоя считаются свободными. В работе [1] изучался случай бесконечного числа Прандтля. Теперь же был изучен случай конечных чисел Прандтля, а точнее, все внимание акцентировалось на случае, когда число Прандтля порядка 1, когда существенно влияние осредненного течения с ненулевой вертикальной завихренностью. Случай для свободных границ в отсутствие магнитного поля и с учетом влияния течений с ненулевой вертикальной завихренностью был изучен ранее в работах Циппелиус, Зиггиа [2, 3] и в работах Буссе и Болтона [4, 5].

Данная задача допускает решение в виде механического равновесия жидкости. Результаты устойчивости механического равновесия, как было установлено ранее [1] не зависят от числа Прандтля. Они заключаются в том, что магнитное поле повышает устойчивость механического равновесия и уменьшает волновое число конвективных структур.

В данной работе исследовались конвективные режимы вблизи порога конвекции. При этом был использован метод многих масштабов, т.е. исследовалось слабо-нелинейное приближение.

Было обнаружено, что устойчивыми в данной задаче могут быть только валы. Ранее в работах [2–5] было показано, что в отсутствие магнитного поля существует критическое значение, ниже которого все валы неустойчивы и, по-видимому, наблюдается фазовый хаос. В данном же исследовании обнаружено, что магнитное поле уменьшает критическое значение числа Прандтля, ниже которого все валы неустойчивы. При этом число Прандтля с увеличением числа Гартмана уменьшается монотонным образом. Таким образом, магнитное поле стабилизирует валы, но при этом нужно иметь в виду, что одновременно оно подавляет их, увеличивая критическое Рэлея, выше которого валы появляются.

1. *Любимов Д.В., Любимова Т.П., Садилов Е.С. Влияние вращающегося магнитного поля на конвекцию в горизонтальном слое жидкости // Изв. РАН. МЖГ. – 2008. – № 2. – С. 3-10.*
2. *Sigia E.D., Zippelius A. Pattern selection in Rayleigh-Benard convection near threshold // Phys. Rev. Lett. – 1981. – V. 47. – P. 835.*
3. *Zippelius A., Siggia E.D. Disappearance of stable convection between free-slip boundaries // Phys. Rev. Lett. A. – 1982. – V. 26. – P. 1788.*
4. *Zippelius A., Siggia E.D. Stability of finite amplitude convection // Phys. Fluids. – 1983. – V. 26. – P. 2905-2915.*
5. *Busse F.H., Bolton E.W. Instabilities of convection rolls with stress-free boundaries near threshold // J. Fluid Mech. – 1984. – V. 146. – P. 115-125.*
6. *Bolton E.W., Busse F.H. Stability of convection rolls in a layer with stress-free boundaries // J. Fluid Mech. – 1985. – V. 150. – P. 487-498.*

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ЧЕРЕЗ ФРОНТ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

П.А. Седых

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

При переходе через фронт плоской ударной волны скачком меняется плотность плазмы и напряженность тангенциальной составляющей магнитного поля. Коэффициент, связывающий плотность перед фронтом и за фронтом в плоской волне, зависит только от показателя адиабаты и равен 4 для одноатомного газа. Для искривленной ударной волны, каковой является головная ударная волна, этот коэффициент зависит также и от расстояния от носовой точки, отсчитываемого вдоль фронта ударной волны. Подобным образом ведет себя и коэффициент, связывающий значения тангенциальной составляющей межпланетного магнитного поля. В работе исследуется зависимость упомянутых коэффициентов от параметров солнечного ветра и от расстояния до носовой точки. На этой основе рассчитывается плотность тока и напряженность электрического поля за фронтом головной ударной волны. Плазма солнечного ветра пересекает фронт головной ударной волны вместе с вмороженным в нее магнитным полем солнечного ветра. Поэтому в системе координат, связанной с фронтом головной ударной волны возникает электрическое поле, пропорциональное тангенциальной компоненте магнитного поля и нормальной (к фронту) компоненте скорости плазмы. Обе эти величины меняются вдоль фронта, вместе с ними меняется и электрический потенциал. За фронтом имеется течение модифицированной плазмы солнечного ветра (magnetosheath, переходный слой), которое тоже несет модифицированное поле солнечного ветра. Скорость и плотность плазмы, а также параметры магнитного поля этого течения могут быть оценены, если форма фронта ударной волны и магнитопаузы считаются известными.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВТ

А.Н. Семко[1], Ю.П. Ивочкин[2], И.О. Тепляков[2], О.В. Казак[1]

[1]*Донецкий национальный университет, Донецк, Украина*
[2]*Объединанный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

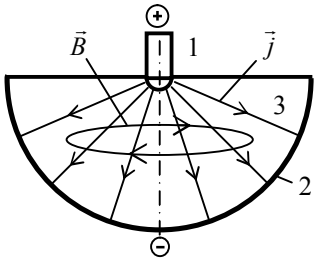


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Целый ряд практических задач связанных с моделированием процессов в электросталеплавильных печах, дуговой электросварке, и других технологических процессах выдвигает задачу создания надежной и относительно простой методики моделирования электровихревых течений (ЭВТ) в различных процессах. Особый интерес при отработке методов и подходом моделирования ЭВТ при растекании электрического тока в полусферическом объеме легкоплавкого расплава металла или сплава, имеющее известное решение для ламинарного течения и экспериментальные промеры скорости для турбулентного течения расплава. На рисунке 1 приведена схема лабораторной установки полусферического объема, где 1 и 2 — верхний и нижний медные электроды в виде полусфер, 3 — расплав металла. В экспериментах измерялись скорость и температура расплава [1].

При теоретическом изучении была разработана физическая и математическая модель протекающих процессов. Для численного моделирования процессов в лабораторной установке разработан алгоритм в рамках пакета ANSYS и COMSOL состоящий из следующих этапов: 1-й — моделирование электромагнитных полей; 2-й — моделирование электровихревых течений.

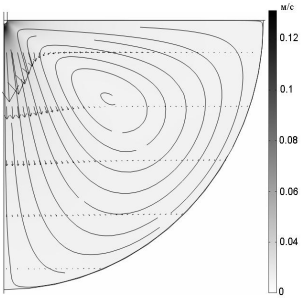


Рис. 2. Поле скорости движения расплава

Для отработки методов и подходов моделирования ЭВТ были проведены расчеты для ламинарного течения в замкнутом полусферическом объеме расплавленного металла, имеющих известное решение [1], а также для турбулентных течений, экспериментально исследованных на лабораторной установке в ОИВТ РАН (Рис. 1). Для нахождения наиболее точно отображающей процессы ЭВТ модели турбулентности проведены расчеты, используя наиболее распространенные из них и сравнивая результаты расчетов с лабораторными исследованиями, тем самым оценивалась достоверность полученных результатов. На рисунке 2 приведены вихревые поля скорости, возникающие при пропускании тока в рассматриваемой установке. Как видно, при пропускании тока в расплаве возникает интенсивное вихревое движение в меридиональной плоскости. Сравнение теоретических и экспериментальных данных [1] показало расхождение порядка 15%, что обусловлено погрешностью измерений и численных методов. Практическое применение разработанной стратегии численного моделирования электровихревых течений позволит оптимизировать целый ряд промышленных процессов [2, 3].

1. *Ivochkin Yu., Oksman A., Kazak O., Teplyakov I., Zhilin V. Numerical and experimental investigation of the electrovortex flow in hemispherical container under action of external magnetic field // 8th Int. PAMIR Conference on fundamental and applied MHD. Borgo, Corsica, France, September 5-9, 2011. – P. 85-88.*
2. *Kazak O., Semko O. Numerical modelling of electrically vortical flows / 8th Int. PAMIR Conference on fundamental and applied MHD. Borgo, Corsica, France, September 5-9, 2011. – P. 605-609.*
3. *Kazak O., Semko O. Modelling magnetohydrodynamic processes in DC arc steel making furnaces with bottom electrodes // Ironmaking and Steelmaking. – 2011. – V. 38, N. 5. – P. 353-358.*

ДИНАМО СРЕДНИХ ПОЛЕЙ С ФЛЮКТУИРУЮЩИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПАРАМЕТРОВ

Д.Д. Соколов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Крупномасштабные магнитные поля небесных тел создаются, как правило, в результате работы динамо среднего поля, основанного на совместном действии дифференциального вращения и зеркально-асимметричной конвекции или турбулентности. Степень этой зеркальной асимметрии измеряется с помощью коэффициента, который принято обозначать α, поэтому говорят об альфа-эффекте.

В зависимости от геометрии тела (сфера, сферическая оболочка или диск) и распределения угловой скорости магнитное поле может монотонно расти, а потом стабилизироваться, либо расти с осцилляциями, а в нелинейном режиме давать т.н. динамо-волны. Возможны и более сложные сценарии.

Наблюдения показывают, что этим не исчерпывается дальнейшая эволюция магнитного поля. Она может включать его инверсии и различные эпизоды со сбоями динамо-волн (глобальные минимумы). В докладе предлагается объяснение этой длинновременной динамики, основанное на представлении о флуктуациях параметров динамо и, прежде всего, коэффициента α.

НАМАГНИЧЕННОСТЬ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ: ВЛИЯНИЕ МНОГОЧАСТИЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

А.Ю. Соловьева, Е.Д. Екатеринчук, А.О. Иванов, Е.А. Елфимова

Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

Феррожидкости представляют собой устойчивые коллоидные системы, состоящие из ферро- или ферримагнитных наночастиц, находящихся во взвешенном состоянии в жидком носителе. Для реальных, широко используемых феррожидкостей типа «магнетит в керосине», стабилизированных олеиновой кислотой, интенсивность магнито-дипольного взаимодействия не принимает высоких значений. Однако, накопленный к настоящему времени экспериментальный и теоретический материал (например, [1, 2]) свидетельствует о том, что даже в таких феррожидкостях, с невысокой интенсивностью магнито-дипольных взаимодействий, важнейшую роль играют межчастичные корреляции.

В настоящей работе методами статистической физики определена намагниченность концентрированных феррожидкостей с учетом многочастичных корреляций в системе. Основной метод исследования заключается в расчете свободной энергии системы магнитных наночастиц, которая представлена в виде вириального ряда по степеням объемной концентрации феррочастиц и интенсивности межчастичного магнито-дипольного взаимодействия. Вириальные коэффициенты рассчитаны с помощью диаграммного алгоритма [3], где основными шагами были усреднения по всевозможным ориентациям магнитных моментов и положениям феррочастиц при условии их взаимного непроникновения друг в друга. Итогом такого подхода стало выражение для свободной энергии как функции температуры, напряженности внешнего магнитного поля и физико-химических характеристик изучаемых феррожидкостей. Аналитическое выражение для намагниченности определялось стандартными методами статистической термодинамики.

Проведен анализ полученного аналитического выражения для намагниченности и сравнение его с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.609.2011).

1. *Иванов А.О., Кузнецова О.Б. Магнитогранулометрический анализ ферроколоидов: модифицированная модель среднего поля второго порядка // Коллоид. журн. – 2006. – Т. 68, № 4. – С. 1.*
2. *Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V, Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids // J. Magn. Magn. Mater. – 1996. – V. 161. – P. 94-102.*
3. *Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 405 с.*

КОРРЕКЦИЯ ОСНОВ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКИ И ТЕОРИИ ДИНАМО

С.В. Старченко

ИЗМИРАН, Троицк, Московская обл., Россия

Представлены такие фундаментальные соотношения, которые не были использованы ранее для решения МГД проблем и проблем гидромагнитного динамо в астрофизических и технических объектах с высокой проводимостью. Для всех подобных объектов доказано, что силовые линии электрического поля в них замкнуты, поскольку свободные электрические заряды должны отсутствовать. Учет полученных в этой работе полностью корректных электромагнитных МГД уравнений может потребовать кардинального пересмотра многих известных МГД и динамо моделей. Другие малоисследованные и редко используемые фундаментальные соотношения связаны с тем, что подавляющее большинство современных работ по гидромагнитному динамо в астрофизических объектах некорректно описывает теплоперенос, что может существенно искажать анализ физической природы исследуемых процессов. При этом переход к полностью корректному описанию незатруднителен и преимущественно требует лишь соответствующего изменения граничных условий.

Корректные электромагнитные уравнения

В МГД пренебрегают токами смещения, сводят систему Масксвелла к

$$\partial\mathbf{B}/\partial t = \nabla\times\left(\mathbf{V}\times\mathbf{B} - \left(\nabla\times\mathbf{B}\right)/\mu\sigma\right) \tag{1}$$

исключая ток **J** и электрическое поле **E** из законов Фарадея, Ампера и Ома:

$$\partial\mathbf{B}/\partial t = -\nabla\times\mathbf{E}\ ,\ \nabla\times\mathbf{B} = \mu\mathbf{J}\ ,\ \mathbf{J} = \sigma\left(\mathbf{E}+\mathbf{V}\times\mathbf{B}\right). \tag{2, 3, 4}$$

Используется в МГД так же связанное с (1) уравнение Максвелла:

$$\nabla\cdot\mathbf{B} = 0\ , \tag{5}$$

но остается неиспользованным закон Пуассона

$$\varepsilon\nabla\cdot\mathbf{E} = \theta \tag{6}$$

и закон сохранения заряда:

$$\partial\theta/\partial t = -\nabla\cdot\mathbf{J}\ . \tag{7}$$

Из (3) и (7) следует, что $\partial\theta/\partial t = 0$ и плотность электрических зарядов θ должна обращаться в ноль, т.к. проводящая область электрически нейтральна. Поэтому

$$\nabla\cdot\mathbf{E} = 0\ . \tag{8}$$

Получаем корректную систему уравнений (2-5) и (8). Используемые до сих пор при решении МГД проблем (1) и (5) являются очевидным следствием этой системы, но обратное утверждение не является верным. Более «жесткая» система из (2-5) и (8) не может быть полностью выведена лишь из (1) и (5), которые поэтому позволяют кроме корректных решений еще и «лишние» решения. Граничные же условия, следующие из корректной системы, еще больше ограничивают подмножество корректных решений, т.к. теперь из-за (8) добавляется ранее совершенно не использовавшееся граничное условие непрерывности нормальной компоненты электрического поля **E**.

Корректное описание теплопереноса

Полученное корректное уравнение теплопереноса для сверхадиабатической энтропии s

$$\frac{Ds}{Dt} = \kappa\nabla^2 s + \frac{Q_a}{\rho_a T_a} \tag{9}$$

формально почти эквивалентно уравнению для температуры, используемому в подавляющем большинстве современных моделей гидромагнитного динамо. Примечательно, что все члены (9) имеют ясный физический смысл, тогда как известные модели, фактически не имеют под собой физических оснований. Вместе с тем, если в подобных моделях использовать корректные граничные условия — то адекватная физическая интерпретация становится возможной при формальной замене входящей в эти модели температуры на энтропию.

РОЛЬ СПИРАЛЬНОСТИ В КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССАХ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Р.А. Степанов, П.Г. Фрик

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Действие динамо представляется основным механизмом генерации магнитных полей в большинстве астрофизических объектов. Проводящая среда, которая генерирует магнитное поле, в общем случае сильно турбулизована ($\mathrm{Re} \gg 1$) и характеризуется выраженным инерционным интервалом. Электрические свойства среды определяются числом Прандтля $\mathrm{Pm} = \nu/\eta$, где ν и η — коэффициенты кинематической вязкости и магнитной диффузии. В жидких ядрах планет и конвективных зонах звезд $\mathrm{Pm} \ll 1$, а в межзвездной среде и корональной плазме $\mathrm{Pm} \gg 1$. При прямом численном моделировании магнитогидродинамической (МГД) турбулентности условия $\mathrm{Re} \gg 1$ и существенное отличие Pm от единицы маловероятно достижимо в ближайшем будущем. Альтернативный подход заключается в использовании каскадных моделей турбулентности.

Каскадные модели зарекомендовали себя как эффективный инструмент исследования статистических свойств развитой мелкомасштабной турбулентности (см., например, [1]), описывающие процессы спектрального переноса в развитой турбулентности с помощью небольшого числа переменных, каждая из которых является коллективной характеристикой амплитуд пульсаций поля скорости и магнитного поля в некотором интервале волновых чисел. Уравнения для коллективных переменных записываются так, чтобы они воспроизводили «базовые» свойства исходных уравнений движения, а именно, имели те же интегралы движения и тот же вид нелинейности. В данной работе использовалась каскадная модель, предложенная в [2].

МГД турбулентность отличается от обычной турбулентности своими законами сохранения, что может приводить к принципиально иному характеру эволюции течений электропроводящей среды. При расчетах долговременного свободного вырождения показана возможность реализации двух сценариев эволюции системы при слабой вариации начального состояния. Ранее известный первый сценарий, характерный для большинства реализаций, соответствует быстрому накоплению перекрестной спиральности, что приводит к состоянию полной коррелированности магнитного поля и поля скорости. Следуя второму, более редкому, сценарию вырождения, система остается при слабом уровне перекрёстной спиральности и достигает существенно более низкого значения кинетической энергии. Впервые удалость установить, что второй сценарий вырождения обусловлен влиянием магнитной спиральности, которая блокирует часть магнитной энергии в крупномасштабной части спектра. Моделирование МГД турбулентности стационарно поддерживаемой внешней силой показывает, что перекрестная спиральность в определенной степени блокирует каскад энергии, а магнитная спиральность способствует обратному каскаду.

1. *Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. – РХД, 2010. – 332 с.*
2. *Мизёва И.А., Степанов Р.А., Фрик П.Г. // ДАН. – 2009. – Т. 424, № 4. – С. 479-483.*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МАГНИЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

А.С. Теймуразов, П.Г. Фрик

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Работа выполнена в связи с исследованием процесса восстановления титана в металлотермическом реакторе. Реторта для восстановления титана представляет собой цилиндрический сосуд, в котором находится слой жидкого металла (магния) при температуре 850 градусов Цельсия. Сверху подается тетрахлорид титана. В результате протекающей на поверхности реакции образуется титановая губка и двухлористый магний, который опускается на дно реторты. Реакция протекает с выделением большого количества тепла, радиальный температурный градиент достигает 500°/м, что не может не привести к мощному конвективному течению, которое должно оказывать существенное обратное влияние на химическую реакцию. В частности именно смена режима конвективного течения среды может приводить к явлению, называемому «неразделением», при котором побочный продукт реакции (соли магния) перестает осаждаться на дно реактора и процесс оказывается испорченным. Цель данной работы — создать гидродинамическую модель процесса и исследовать с ее помощью влияние конвекции на протекание реакции.

Осуществляется прямое численное моделирование течения в цилиндрической области с твердыми границами в осесимметричной постановке. Математическая модель основана на уравнениях гидродинамики для однофазной среды в приближении Буссинеска. Считается, что конвективное движение вызвано горизонтальным градиентом температуры, возникающим в результате протекания экзотермической химической реакции на поверхности жидкости. В расчетах для температуры задаются следующие граничные условия: на боковых стенках и на дне поддерживается постоянная заданная температура, а на верхней границе задается параболический профиль температуры с максимумом в центре.

Уравнения решаются методом конечных объемов. Неявная разностная схема аппроксимирует исходную систему дифференциальных уравнений со вторым порядком точности по координате и по времени. При этом значения управляющих параметров были приближены к реальным значениям параметров физического процесса. Программная реализация алгоритма осуществлялась с учётом возможности расчётов на многопроцессорных системах.

Конвективные параметры среды соответствуют жидкому магнию при температуре 850 градусов Цельсия. Число Прандтля Pr = 0.0087. Реторта имела размеры: радиус r = 0.6 м, высота H = 2.4 м. Разность температур ΔT варьировалась от 1°K до 250°K. При этом число Грасгофа изменялось до $\mathrm{Gr} = 3.8 \cdot 10^{11}$. При таком числе Грасгофа течение является нестационарным и конвекция носит ярко выраженный погранслойный характер. В результате исследований изучена структура течения жидкости и получены оценки для максимальной скорости движения среды в реакторе.

ИЗГИБНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЖИДКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ В ТОНКОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ

Е.С. Ткачева, А.Р. Закинян, Ю.И. Диканский

Ставропольский государственный университет, Ставрополь, Россия

В последнее время стали актуальными и востребованными исследования в области создания новых так называемых умных функциональных материалов. К таким материалам в частности можно отнести магнитодиэлектрические эмульсии. Их отличительной особенностью является возможность контролируемого и целенаправленного управления макроскопическими свойствами в широком диапазоне параметров при помощи внешних силовых полей. Это достигается за счет возможности варьирования и контроля внутренней микрогеометрии материла и процессов динамики его дисперсной фазы.

В качестве объекта для исследования была выбрана магнитодиэлектрическая эмульсия дисперсная фаза, которой была представлена каплями жидкого каучука, а дисперсионная среда — магнитной жидкостью на основе керосина с олеиновой кислотой в качестве стабилизатора. Выбор такой дисперсной фазы был обусловлен возможностью целенаправленного изменения ее вязкости, например керосином.

Экспериментальные исследования проводились с помощью наблюдения через оптический микроскоп. Капли дисперсной фазы деформировали с помощью постоянного магнита. Как известно эти капли вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля. Затем резким наложением стационарного магнитного поля перпендикулярного исследуемому слою вытянутые немагнитные полосы деформировались и в зависимости от напряженности магнитного поля и толщины образца наблюдались либо фигуры напоминающие «синусоиды», либо «синусоиды» с отростками.

Для анализа поведения образца, была построена фазовая диаграмма, характеризующая деформацию жидкой полосы каучука под действием перпендикулярного магнитного поля. В ходе эксперимента было обнаружено, что длина волны «синусоиды» обратно пропорционально зависит от напряженности магнитного.

При дальнейшем изучении поведения образца в магнитном поле интересным было изучить влияние на него электрического поля. Для этого использовалась ячейка, представляющая собой два стекла с токопроводящим покрытием. Между стеклами помещалась фторопластовая пленка с отверстием посередине. Толщина слоя составляла 20 мкм. Оказалось, что в электрическом поле полосы образца также деформируются, принимая форму «синусоиды». Наблюдаемый процесс так же зависит от напряженности электрического поля и от толщины образца.

Таким образом, в ходе проведенных исследований был выявлен ряд новых закономерностей поведения диэлектрической полосы, помещенной в магнитную жидкость под действием внешних полей. Кроме описанных исследований нами так же были проведены эксперименты показывающие влияние на такую систему совместного действия магнитного и электрического полей, выявлено условие компенсации деформированного образца. Также было исследовано поведение магнитной полосы, помещенной в немагнитную среду. Все описанные результаты требуют теоретического обоснования, над чем мы и работаем в настоящее время.

1. *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне, 1989. – 387 с.*
2. *Ткачева Е.С., Закинян А.Р. Динамика формы магнитных и немагнитных капель магнитодиэлектрических эмульсий в магнитном и электрическом полях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 4. – С. 76-82.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

П.Г. Фрик, В.И. Носков, С.А. Денисов, Р.А.Степанов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Представлены результаты косвенных измерений двух коэффициентов переноса в импульсных турбулентных потоках жидкого натрия: эффективного (турбулентного) коэффициента диффузии магнитного поля и коэффициента турбулентной вязкости. Первый вычислялся по измерениям интегральной электропроводности, а второй — по измерениям локальной скорости. Поток возбуждался в быстровращающемся тороидальном титановом канале путём его резкого торможения.

Измерения эффективной диффузии магнитного поля в турбулентном потоке проводящей жидкости выполнены впервые. Несмотря на то, что концепция турбулентной магнитной диффузии (по аналогии с турбулентной вязкостью) более полувека широко используется в моделях генерации магнитного поля турбулентными потоками проводящей среды, зарегистрировать зависимость коэффициента диффузии магнитного поля от степени турбулизации потока до сих пор не удавалось. В ИМСС УрО РАН была предложена уникальная методика оценки этого коэффициента в нестационарном потоке жидкого металла. Первые измерения были выполнены в потоках жидкого галлия при малых магнитных числах Рейнольдса, $Rm < 1$, и обнаружили усиление магнитной диффузии на величину порядка 1%.

Реконструкция экспериментальной установки позволила выполнить эксперименты в потоках жидкого натрия. При этом измерения показали, что максимальное усиление диффузии магнитного поля за счет турбулентных пульсаций скорости достигает 50%. Коэффициент кинематической вязкости определялся как отношение квадрата плотности энергии турбулентных пульсаций к скорости её диссипации. Для нахождения указанных величин были произведены измерения двух компонент вектора скорости потока жидкого натрия двухкоординатным кондукционным датчиком. Получены законы вырождения энергии среднего течения, энергии пульсаций, коэффициента анизотропии и турбулентной вязкости. Показано, что поведение эффективной диффузии существенно зависит от магнитного числа Рейнольдса Rm, определенного по амплитуде среднеквадратичных пульсаций скорости и радиусу сечения канала. При $Rm < 1$ коэффициент турбулентной диффузии растет пропорционально квадрату магнитного числа Рейнольдса, а при $Rm > 1$ становится пропорциональным коэффициенту турбулентной вязкости.

МГД – ПРОЦЕСС В СЛОЕ ГРАВИТИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ УВЕЛИЧИВАЮЩЕГОСЯ РАДИУСА

Ю.В. Хачай

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Механизм возникновения геомагнитного поля является одной из принципиальных проблем физики Земли. Обнаружение образцов пород с возрастом остаточной намагниченности более 3.9 млрд. лет, по-видимому, исключает из рассмотрения модели, в которых формирование расплавленного состояния внешнего ядра рассматривается только в уже сформировавшейся, первично сравнительно холодной планете, как это следовало из ранних моделей аккумуляции [1]. В работах [2, 3] рассмотрены модели аккумуляции Земли, опирающиеся на результаты современных изотопных исследований. Получены варианты численного решения задачи, позволяющие получить варианты распределения температуры, давления, вязкости вещества на стадии аккумуляции планеты. В этих вариантах прослеживается формирование слоя расплава во внешней части ядра, имеющего преимущественно железный состав, либо имеющий непосредственный контакт с поверхностью, либо отделенный от нее тонким слоем силикатов.

В работе приведены результаты численного моделирования развития МГД течений в слое гравитирующей сферы увеличивающегося радиуса на стадии аккумуляции планеты.

Рассматривается модель свободной конвекции, вклад ударного перемешивания в слое не учитывается.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00983).

1. *Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – М.: Наука, 1969. – 244 с.*
2. *Анфилогов В.Н., Хачай Ю.В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. – 2005. – Т. 403, № 6. – С. 803-806.*
3. *Khachay Yu., Anfilogov V. Variants of temperature distributions in the Earth on its accumulation. // Kiev. The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy, and astronomy. – 2009. –240 c.*

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ ПРИ МГД-ПЕРЕМЕШИВАНИИ

С.Ю. Хрипченко[1,2], В.М. Долгих[1], С.А. Денисов[1], Л.В. Никулин[1], И.В.Колесниченко[1], В.Я.Заякин[2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Положительное влияние перемешивания на структуру отвердевающего металла известно давно. С шестидесятых годов прошлого века для этих целей на некоторых предприятиях применяется бегущее или вращающееся магнитное поле, осуществляющее МГД-перемешивание при литье непрерывных алюминиевых или стальных слитков. Очевидно, что управляя топологией и интенсивностью перемешивающего течения расплава, можно влиять на свойства получаемых слитков.

В работе проводились экспериментальные исследования особенностей строения цилиндрических слитков из сплавов алюминия, кристаллизующихся при МГД-перемешивании, возбуждаемом бегущим и вращающимся магнитными полями.

Экспериментальная установка представляла собой МГД-перемешиватель, создающий независимо регулируемые бегущее и вращающееся магнитные поля. В перемешиватель помещался металлический цилиндрический тигель. Боковые стенки тигля теплоизолировались, а дно охлаждалось проточной водой. МГД-перемешиватель настраивался на определенный режим перемешивания, после чего в тигель при заданной температуре заливался алюминиевый сплав. После отверждения слитка и понижении его температуры, слиток разрезался по средней части, и исследовалось его строение.

Было установлено, что строение слитка величина зерна сплава, и другие физические параметры зависят от интенсивности и топологии перемешивающего движения в процессе кристаллизации. Так, например твердость сплава алюминия с цинком растет, а величина зерна в среднем уменьшается при возрастании интенсивности тороидального перемешивания.

Работа выполнена при поддержке субсидии проекта Международной исследовательской группы « Магнитогидродинамическое перемешивание жидкого металла и его воздействие на структуру затвердевающих сплавов».

МГД – ПРИНЦИПЫ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

С.Ю. Хрипченко[1,2], В.М. Долгих[1], С.А. Денисов[1], И.В.Колесниченко[1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Если по жидкому металлу пропускать большой электрический ток, то в результате взаимодействия тока со своим магнитным полем возникнут объемные силы. В результате действия этих сил в жидкости могут возникнуть разного рода течения, а так же градиенты давления. Если использовать различной конфигурации ферромагнитные сердечники, которые специфическим образом охватывают МГД канал и усиливают магнитное поле электрического тока текущего по металлу, можно не только усилить эффект, но и получить ряд новых эффектов. Эти эффекты можно использовать в прикладных целях в металлургическом производстве. Например, создавая электровихревые течения, возможно, перемешивать жидкий металл в ваннах и тиглях, а также непосредственно в процессе литья металла. Используя эффект взаимодействия тока с собственным магнитным полем возможно управлять потоками жидкого металла, например перекачивать жидкий металл, подавая его из печи на литейный конвейер.

В докладе приводятся различные примеры и обсуждаются принципы создания электровихревых течений в плоских МГД-каналах с ферромагнитными сердечниками. Приводятся примеры различных МГД-насосов работа, которых обусловлена главным образом потенциальной частью электромагнитных сил возникающих в результате взаимодействия тока со своим магнитным полем либо в результате генерации в МГД-канале электровихревого течения специфической конфигурации.

В докладе рассматриваются различные МГД-эффекты и возможности их применения в различных технологических устройствах.

Работа выполнена при поддержке субсидии проекта Международной исследовательской группы «Магнитогидродинамическое перемешивание жидкого металла и его воздействие на структуру затвердевающих сплавов».

КОНВЕКЦИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.И. Цаплин, И.Л. Никулин, А.В. Перминов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Технологический прогресс в авиастроении в значительной мере определяется качеством применяемых конструкционных материалов. Так при индукционной плавке никелевых жаропрочных сплавов возникают проблемы, связанные с распределением примесей в расплаве, которые могут быть решены управлением течениями металла в тигле на этапе подготовки металла к заливке в формы.

Для изучения основных закономерностей в движении расплава металла в переменном магнитном поле разработана математическая модель, в которой рассматривается заполненная парамагнитным проводящим расплавом цилиндрическая область, ось симметрии которой направлена вертикально. Модель включает:

1) уравнения, описывающие пространственное распределение магнитного поля индуктора, который представляет собой короткую катушку;

2) уравнения для индукционных токов, возникающих в объёме металла при изменении магнитного поля индуктора;

3) уравнение переноса тепловой энергии, учитывающее движение среды и действие объёмных источников тепла;

4) уравнения конвекции расплава в приближении Бусинеска.

На твердых боковой и нижней границах области выполняются условия прилипания. Температура этих границ считается заданной. Верхняя граница расплава считается свободной и на ней задан тепловой поток.

Оценка частоты изменения внешнего магнитного поля, при котором это поле будет влиять на течение проводящей жидкости [1] при характерных размере области $R \sim 0{,}1$ м, перепаде температуры $\theta = 20$ К, коэффициенте объёмного расширения $\beta \sim 10^{-4}$ $К^{-1}$ даёт значение 0,4 $с^{-1}$, что значительно меньше, чем частота поля индуктора 1…2 кГц. Из оценок следует, что внешнее магнитное поле не оказывает существенного влияния на течение расплава, и проявляет себя лишь в генерации джоулевой теплоты индукционных токов. С другой стороны течение расплава не влияет на распределение индукционных токов. Результирующее магнитное поле оказывается «жёстко связанным» с индуктором.

Таким образом, сопряжённая электромагнитная-термоконвекционная задача может рассматриваться последовательным решением следующих подзадач:

1) расчёт пространственного распределения магнитного поля индуктора в объёме расплава;

2) расчёт индукционных токов и объёмной мощности источников джоулевой теплоты;

3) решение задачи тепломассопереноса с известным распределением внутренних источников теплоты.

Математическая модель реализована в виде пакета программ на языке фортран.

В приближении осесимметричного индуктора (система коаксиальных колец равного радиуса с постоянным шагом вдоль оси) для различных конфигураций индуктора рассчитаны распределения вектора индукции магнитного поля в области расплава металла, плотности индукционных токов и мощности источников теплоты, изучена структура течений, возникающих в расплаве.

2. *Ландау Л.Д., Лившиц И.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.*

ПОМАСШТАБНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ДАННЫХ ГАЛАКТИКИ NGC 6946

А.В. Чупин[1], Р.А. Степанов[1], П.Г. Фрик[1], Д.Д. Соколов[2], Р. Бек[3]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[2]*Московский государственный университет, Москва, Россия*
[3]*Институт радиоастрономии Макса Планка, Бонн, Германия*

Магнитные поля галактик в основном исследуются по данным их радиоизлучения. В силу эффекта Фарадея угол плоскости поляризации этого излучения, пропорциональный поперечной компоненте магнитного поля, поворачивается на величину, пропорциональную продольную компонентам магнитного поля, это позволяет анализировать трёхмерную структуру магнитного поля в удалённых объектах. Здесь находит применение так называемый RM-синтез [1] — по сути, обратное преобразование Фурье по длинам волн, в которых велось наблюдение. В результате получается зависимость от так называемой фарадеевской глубины $\varphi = -0,81\int_z^0 B_\parallel n_e dz'$. Чем больше диапазон наблюдаемых длин волн, тем больше разрешение по глубине; чем больше каналов наблюдения, тем шире диапазон по глубине. Исследование проводилось на галактике NGC 6946 (галактика «Фейерверк»), для которой имеется 512 каналов для диапазонов длин волн около 18 и 21 см, полученных на Westerbork Synthesis Radio Telescope [2].

Классический RM-синтез восстанавливает поле целиком, без учёта корреляции между точками небесной сферы, поэтому оказывается невозможным анализировать местонахождение различных физических эффектов в галактике, которые могут соответствовать различным размерам структур. Так, ударные волны в межзвёздной среде лучше всего проявляются на масштабе «рукавов», а мелкомасштабная компонента показывает интенсивность турбулентного.

Эта проблема решается применением вейвлет-анализа, с помощью которого можно восстанавливать начальные поля по отдельным масштабам. Вейвлет-анализ зарекомендовал себя [2] как лучший метод для выделения основных масштабов на изображении галактик. Он используется также для самого RM-синтеза, позволяя более точно восстанавливать распределение объёмных источников, в том числе их начальные углы поляризации [3].

В работе с помощью RM-синтеза были получены двумерные распределения функции поглощения («фарадеевской функции дисперсии») поляризованного излучения NGC 6946 для широкого набора фарадеевских глубин, произведено уточнение с помощью процедуры CLEAN [2]. Далее были выделены различные масштабы на изображениях с помощью разложения по вейвлетам. Оказалось, что мелкомасштабная компонента центрирована около отрицательных глубин, в то время как все остальные масштабы имеют максимум на положительных глубинах. Это можно объяснить несимметричностим расположением гало галактики относительно её центрального диска. Это является новым результатом.

Во время получения синтезированного куба данных было выяснено, что процедура CLEAN является неустойчивой, а для заданного короткого диапазона волн может вместо распределённого источника излучения показывать неопределённое распределение точечных. Поэтому для итогового результата были использованы необработанные этой процедурой данные, что давало размытые источники, но не приводило к искажению информации.

1. *Brentjens M.A., de Bruyn A.G. // Faraday rotation measure synthesis. – 2005. – V. 441. – P. 1217-1228.*
2. *Heald G., Braun R., Edmonds R. The Westerbork SINGS survey. II Polarization // Faraday rotation, and magnetic fields. – Astronomy & Astrophysics. – 2009. – V. 503. – P. 409-435.*
3. *Frick P., Beck R., Berkhuijsen E.M., Patrickeyev I. Scaling and correlation analysis of galactic images // Monthly Notes Royal Academy of Sciences. – 2001. – V. 327 – P. 1145-1157.*
4. *Frick P., Sokoloff D., Stepanov R., Beck R. Wavelet-based Faraday rotation measure synthesis // Monthly Notes Royal Academy of Sciences. – 2010. – V. 401. – P. 24-28.*

АССИМЕТРИЧНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА С НЕОДНОРОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Д.А. Шалыбков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время критерий устойчивости вращающейся жидкости при наличии неоднородной плотности известен только для осесимметричных возмущений. Хорошо установлено (как теоретически [1, 2], так и подтверждено экспериментально [3]) наличие асимметричной стратовращательной неустойчивости цилиндрического течения Куэтта при наличии устойчивой осевой стратификации плотности. Однако линейная устойчивость течения Куэтта с радиальной стратификацией плотности до сих пор исследована только по отношению к осесимметричным возмущениям. В настоящей работе представлены результаты по асимметричной устойчивости течения Куэтта с радиальной стратификацией плотности. Показано, что так же, как и в случае осевой стратификации плотности, устойчивая радиальная стратификация плотности приводит к дестабилизации течения Куэтта по отношению к асимметричным возмущениям. В результате, течение Куэтта, устойчивое в отсутствие радиальной стратификации плотности, может стать неустойчивым по отношению к асимметричным возмущениям при наличии устойчивой радиальной стратификации плотности. Данный результат может иметь существенное значение для задачи об устойчивости аккреционных дисков.

1. *Shalybkov D., Rudiger G. // Astron. Astrophys. – 2005. – V. 438. – P. 411.*
2. *Rudiger G., Shalybkov D. // Astron. Astrophys. – 2009. – V. 493. – P. 375.*
3. *Le Bars M., Le Gal P. // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99. – P. 064502.*

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА С НЕОДНОРОДНЫМ ОСЕВЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Д.А. Шалыбков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена линейная устойчивость несжимаемой неидеальной жидкости, находящейся между двумя вращающимися соосными бесконечными цилиндрами, по отношению к осесимметричным возмущениям при наличии неоднородного осевого магнитного поля. Для проводящих цилиндров результаты для однородного и неоднородного магнитных полей качественно совпадают. Это же имеет место для непроводящих цилиндров при наличии магнитного поля неизменного направления. Для непроводящих цилиндров и магнитного поля переменного направления с величиной, превосходящей некоторое критическое значение, возникает неустойчивость. Эта новая неустойчивость существует и в отсутствие вращения и, следовательно, не зависит от его параметров. Кроме того, величина критического магнитного поля не зависит от магнитного числа Прандтля, что является благоприятным фактором для экспериментального наблюдения новой неустойчивости.

ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КИПЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

А.А. Яновский, А.Я. Симоновский

Ставропольский государственный университет, Ставрополь, Россия

Кипение магнитной жидкости, как и любой другой жидкости, сопровождается образованием паровых пузырьков в объеме жидкости. При описании процессов происходящих в двухфазной системе пар-жидкость важная роль отводится частоте образования пузырьков пара. Этот параметр важен не только с точки зрения анализа поверхностных явлений, происходящих на границе раздела двух фаз, но и с точки зрения описания теплообменных процессов, происходящих в кипящей жидкости.

Влияние магнитного поля на частоту образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости, все еще остается малоизученным аспектом теплофизики магнитных жидкостей. В связи с этим возникает вопрос об изучении влияния постоянных магнитных полей на частоту образования пузырьков пара. Наиболее эффективными методами изучения кипения жидкостей являются оптические методы. Однако, магнитные жидкости непрозрачны, что усложняет или делает невозможным использование этих методов на практике.

В настоящей работе, для измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости, использовался фотографический метод с применением двухслойной среды – непрозрачной магнитной жидкости и прозрачной жидкости с меньшей плотностью, расположенной сверху. Это позволило визуализировать процессы всплытия пузырьков пара при переходе ими границы раздела сред, а также измерить частоту образования пузырьков пара, фиксируя процесс их всплытия высокоскоростной видеокамерой.

Полученные результаты показали, что однородное постоянное магнитное поле может, как интенсифицировать процесс кипения, увеличивая частоту образования пузырьков пара в несколько раз, так и при определенном значении напряженности поля, уменьшать ее. Кроме того, было установлено, что с увеличением напряженности однородного постоянного магнитного поля, увеличивается значение температуры теплоотдающей поверхности, при которой начинается процесс кипения магнитной жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-01-00051-а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТОКОНЕСУЩИХ РАСПЛАВАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

И.М. Ячиков, И.В. Портнова

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия,

В металлургической промышленности достаточно широко распространены различные технологии с использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичными примерами являются выплавка металлов в дуговых и плазменных печах, установки электрошлакового и вакуумно-дугового переплава, рудотермические и рудовосстановительные печи, электролизеры для получения алюминия и магния.

Необходимо отметить, что на всех установках, где есть большие токи, протекающие через расплав, имеет место его перемешивание за счет электровихревых течений (ЭВТ). В дуговых печах постоянного тока (ДППТ) ЭВТ вызывают как *положительные* явления: отвод тепла от дуги вглубь металла, уменьшение температуры поверхности расплава, интенсификация перемешивания расплава и тепломассообменных процессов, так и *негативные*: возникновение устойчивых торроидальных вихрей, приводящих к разрушению футеровки в районе подового электрода.

В работе предложены математические модели для изучения электровихревых течений в токонесущих расплавах металлургических агрегатов. Разработаны компьютерные программы, позволяющие численно моделировать в ванне токонесущего расплава объемные электромагнитные силы, электрическое и магнитное поля при двух и трех токоподводах, а также программы, позволяющие проводить имитационное моделирование нестационарных электровихревых течений в ванне расплава при осесимметричном растекании тока [1].

С помощью созданных математических моделей показаны механизмы возникновения и динамика развития вихрей в районе подовых электродов в ванне дуговой печи постоянного тока. Установлены основные факторы, влияющие на характер течения расплава в ванне. Посредством исследований на компьютере показано наличие симметрии электромагнитных полей, объемных электромагнитных сил и параметров электровихревых течений в ванне расплава при наличии двух и трех токоподводов. Установлены основные электромагнитные, силовые и гидродинамические особенности, появляющиеся при переходе от одного подового электрода, ось которого совпадает с осью ванны, к электроду, ось которого параллельна оси ванны и далее — к двум асимметрично расположенным подовым электродам.

Предложена новая схема управления токами, протекающими через два подовых электрода дуговой печи постоянного тока, позволяющая интенсифицировать перемешивание и усилить подавление электровихревых течений в районе подины при постоянной мощности дуги. Показаны возможности управления интенсивностью и направлением течения расплава в ванне ДППТ за счет изменения сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды [2].

1. *Ячиков И.М. Моделирование электровихревых течений расплава в ванне ДППТ с осесимметричным подовым электродом // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2010. – № 1. – С. 11–16.*
2. *Ячиков И.М., Логунова О.С. Управление объемными электромагнитными силами ванне дуговой печи постоянного тока // Автоматизация в промышленности. – 2010. № 7. – С. 20-23.*

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

G
Golbraikh E. 30
K
Kapusta A. 30
M
Mikhailovich B. 30
Miralles S. 78
P
Plihon N. 78
А
Аль-Джаиш Таха Малик Мансур.
Анисимов А.М. 7
Анохин Д.А. 63
Ахметьев П.М. 8
Б
Байкин А.Н. 9
Балмасова О.В. 10, 89
Баталов В.Г. 11
Баштовой В.Г. 12, 13
Безносов А.В. 14
Бек Р. 104
Беляев И.А. 15
Боев М.Л. 82
Боек Т. 43
Божко А.А. 16, 17, 18
Бойчук А.Н. 19
Буркова Е.Н. 20
Бушуева К.А. 21
Быстрай Г.П. 22
В
Виноградова А.С. 24
Витковский И.В. 25
Волкова Т.И. 26
Г
Гао Ю 65
Генин Л.Г. 27
Гладких Д.В. 34
Глухов А.Ф. 28, 29
Головин С.В. 8, 31
Гусева А.А. 48
Д
Дей П. 43
Демин В.А. 28, 29
Денисов С.А. 32, 33, 35, 74, 99, 101, 102
Диканский Ю.И. 34, 98
Долгих В.М. 32, 33, 35, 101, 102
Е
Екатеринчук Е.А. 94
Елфимова Е.А. 36, 37, 38, 94
Епифанов Ю.А. 38
Ефимова В.А. 36
Ж
Жанг Х. 65
З
Закинян А.Р. 98
Захлевных А.Н. 19, 39, 40, 41
Заякин В.Я. 101
Зибольд А.Ф. 42
Зиканов О.Ю. 43, 44
Золотухин А.А. 34
Зубарев Н.М. 45
И
Иванов А.О. 63, 94
Иванов А.С. 46
Иванов С.Л. 47
Ивочкин Ю.П. 27, 48, 92
К
Казак О.В. 49, 92
Канторович С.С. 63, 64, 70, 72, 85, 88
Капуста А. 50
Кириллов И.Р. 7, 51, 52
Клименко Е.М. 53
Климович С.В. 13
Клиорин Н.И. 54
Клюкин А. 55
Колесников Ю.Б. 56, 57
Колесниченко И.В. 32, 33, 58, 59, 75, 78, 101, 102
Королев В.В. 10, 60, 89
Королев Д.В. 60
Котельникова М.С. 61
Кочурин Е.А. 45
Краснов Д. 43
Кременецкий В. 62
Крутикова Е.В. 63, 64
Кузанян К.М. 65
Кузнецов А.А. 87
Кулагина К.В. 66
Кучукова М.Т. 16
Л
Лахтина Е.В. 67
Лебедев А.В. 68
Листратов Я.И. 15, 44
Лыков И.А. 22
М
Макаров Д.В. 19, 40
Мальгачева И.А. 28
Мельников И.А. 27
Миндубаев М.Г. 69
Минина Е.С. 64, 70
Михайлович Б.М. 50, 59
Молоков С.Ю. 71, 79
Моцар А.А. 13
Муратова А. 72
Мьо Мин Тан 82

Н
Налетова В.А. 24, 26, 73
Никулин И.Л. 103
Никулин Л.В. 101
Новожилова О.О. 14
Носков В.И. 74, 99
О
Оборин П.А. 7, 75, 76
Обухов Д.М. 52
Огнерубов Д.А. 44
Орлов В.А. 66, 77
Охотников С.А. 22
П
Павлинов А.М. 59, 78
Паксютов К.В. 77
Педченко А.В. 71, 79
Пелевина Д.А. 73
Перминов А.В. 103
Петров Д.А. 39
Пипин В.В. 80
Полунин В.М. 81, 82, 83
Попов Е.А. 29
Попова Е.П. 84
Портнова И.В. 108
Преслицкий Г.В. 7, 52
Прокопьева Т.А. 85
Путин Г.Ф. 16, 17, 18
Пшеничников А.Ф. 20, 86, 87
Пьянзина Е.С. 88
Р
Разуванов Н.Г. 15, 27
Райхер Ю.Л. 41
Рамазанова А.Г. 10, 60, 89
Рекс А.Г. 13, 24
С
Савинов С.Ю. 14
Садилов Е.С. 90
Сакураи Т. 65
Свиридов В.Г. 15, 27, 44
Свиридов Е.В. 15, 27, 44
Седых П.А. 91
Семко А.Н. 92
Сидоров А.С. 18
Симоновский А.Я. 53, 107
Соколов Д.Д. 65, 93, 104
Соловьева А.Ю. 94
Старченко С.В. 95
Степанов В.И. 41
Степанов Р.А. 58, 74, 96, 99, 104
Стороженко А.М. 83
Суслов С.А. 18
Сухановский А.Н. 11
Сычев Г.Т. 82
Т
Теймуразов А.С. 97
Тепляков И.О. 48, 92
Тесс А. 56, 57
Тильман Б. 50
Ткачева Е.С. 98
Турков В.А. 24, 26, 73
Турышева Е.В. 37
Ф
Флёров А.В 47
Фрик П.Г. 74, 97, 99, 104
Х
Хавкин М. 50
Халилов Р.И. 32, 35, 58, 59, 78
Хачай Ю.В. 100
Хрипченко С.Ю. 32, 33, 35, 76, 101
Ц
Цаплин А.И. 103
Ч
Чупин А.В. 104
Ш
Шалыбков Д.А. 105, 106
Я
Яновский А.А. 107
Ярмонов М.В. 14
Ячиков И.М. 108
Яшкова В.И. 60, 89

Научное издание

РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

Тезисы докладов российской конференции
по магнитной гидродинамике
Пермь, Институт механики сплошных сред УрО РАН
18 – 22 июня 2012 г., Пермь, Россия

Издается в авторской редакции

Отпечатано в типографии ООО «Ай Кью Пресс» 614039, г. Пермь, ул. Пушкина, 80
Подписано в печать 06.06.2012 г. Формат 60x84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура Таймс.
Печать электрографическая. Тираж 130 экз. Заказ № 21619.
Тел. (342) 240 36 70, e-mail: vizitka@perm.ru www.iqpress.ru

Контактная информация:
Contact information:
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1
1, Acad. Korolev str., Perm, 614013, Russia

Tel: 8 (342) 237-83-22
8 (342) 237-83-06
web-page: www.icmm.ru
e-mail: mhd@icmm.ru