



Российский
научный
фонд



Российский научный фонд
Проект № 19-77-30008-П
«Разработка теоретических основ и практических методов
интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»

Шестая Школа молодых ученых
**«Мониторинг природных и
техногенных систем»**

ПРОГРАММА

28 – 29 ноября 2024 г.

Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
г. Пермь

Программа Школы молодых ученых включена в план Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике и соответствует тематике Пермского научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».



28 ноября Четверг

9:45 - 10:00	Открытие работы Школы
10:00 - 10:45	Санфиров Игорь Александрович Геофизический мониторинг при эксплуатации месторождений водорастворимых руд
10:45 - 11:30	Афанасьев Андрей Александрович Многофазная фильтрация при размещении углекислого газа в водонасыщенных и нефтяных пластах
11:30 – 11:45	Кофе
11:45 - 12:30	Будадин Олег Николаевич Развитие методов и приборов неразрушающего контроля композитных материалов
12:30 – 13:15	Обед
13:15 - 14:00	Файнбург Григорий Захарович Проблемы цифровизации и мониторинга процессов проветривания рудников
14:00 - 14:45	Исаевич Алексей Геннадьевич Мониторинг и управление пылевой обстановкой в рабочих зонах калийных рудников
14:45 – 15:00	Кофе
15:00 - 15:30	Девятков Сергей Юрьевич Мастер-класс «Геомеханическое сопровождение радарного мониторинга оседаний земной поверхности в процессе ведения горных работ»
15:30 – 16:00	Попов Максим Дмитриевич Мастер-класс «Физическое моделирование процессов теплопереноса в наклонных горных выработках с интенсивными источниками тепловыделения»

Санфиоров Игорь Александрович



Доктор технических наук, профессор, директор Горного института УрО РАН, Область научных интересов: теоретические и методические основы сейсмических и акустических исследований строения и состояния горного массива. Цифровой измерительно-обрабатывающий комплекс малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения, разработанный под его руководством, включен в перечень важнейших достижений РАН в области естественных наук за 1994 год. Действительный член Международного общества разведочной геофизики (SEG), Европейской ассоциации геоученых и инженеров (EAGE) до 2022 г. Действительный член Евро-Азиатского геофизического общества (ЕАГО) и председатель направления «Малоглубинные науки» в Ассоциации геологов геофизиков и инженеров (АГГИ). Автор монографии «Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ» и около 200 статей, процитированных 1113 раз (по сведениям РИНЦ). Имеет 5 авторских свидетельств в области

сейсмической разведки.

Геофизический мониторинг при эксплуатации месторождений водорастворимых руд

Главным условием обеспечения безопасной подземной разработки месторождений водорастворимых полезных ископаемых является сохранение полной водонепроницаемости пород водозащитной толщи (ВЗТ). Нарушение сохранности ВЗТ привело к затоплению десятков калийных и каменно-соляных рудников в разных странах мира. С целью выявления аномальных геологических особенностей ВЗТ, определения степени их опасности и контроля напряжённо-деформированного состояния горного массива выполняются геофизические исследования.

В рамках лекции планируется рассмотреть на примере крупнейшего в Европе Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей возможности разведочной геофизики при мониторинге состояния водозащитной толщи. В условиях ВКМКС обосновано использование сейсмоакустических, гравиметрических и электрометрических методов разведочной геофизики и сейсмологического контроля. Применяются наземные, подземные и наземно-подземные модификации. Основным геофизическим методом контроля состояния подработанного горного массива являются мониторинговые наземные сейсморазведочные работы с последующей геомеханической интерпретацией. Дополнительно в комплексе с сейсморазведочными мониторинговыми работами на отдельных участках выполняется наземная электроразведка. В отдельных случаях как дополнительный метод контроля изменения состояния горного массива применяются гравиметрические работы.

Специфика представляемых геофизических технологий, направленных на решение мониторинговых задач, вызвана как природными, так и техногенными обстоятельствами. Природные: незначительная глубина залегания и размеры объектов исследований, значительная латеральная изменчивость их строения и свойств, нефтеносность подстилающих отложений. Техногенные: значительные объемы выработанного пространства, территориальная совмещенность с градопромышленными узлами.

Афанасьев Андрей Александрович



Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Общей гидромеханики НИИ механики МГУ, профессор кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ, лауреат Медали РАН для молодых ученых и Премии Правительства Москвы молодым ученым. Специалист в области механики многофазных сред, теории фильтрации и их приложению к проблемам рационального недропользования.

Многофазная фильтрация при размещении углекислого газа в водонасыщенных и нефтяных пластах

Климатические изменения на Земле связывают с антропогенными выбросами парниковых газов в атмосферу. Активная борьба с глобальным потеплением, в том числе введение налогов и квот на эмиссию углекислого газа, трансграничное углеродное регулирование и стремление к созданию углеродно-нейтральной экономики, требует трансформации традиционных энергосистем, в основе которых лежит использование ископаемого топлива. Обеспечение нулевого баланса выбросов углекислого газа – CO_2 – требует создания перспективных решений в области декарбонизации топливно-энергетического комплекса. Одним из таких решений является размещение CO_2 в водонасыщенных и нефтяных пластах, которое предполагает закачку газа через скважины. Размещение CO_2 сопровождается многофазными фильтрационными течениями газа и жидкостей, насыщающих пласты.

В лекции будет дан обзор исследований многофазных течений, связанных с закачкой парниковых газов (CO_2) в проницаемые пласты. В рамках таких исследований, проводящихся в лаборатории Общей гидромеханики НИИ механики МГУ, решены автомодельные задачи, описывающие процессы в призабойной зоне скважины на начальном этапе нагнетания газа. В явном виде получено соотношение для скин-фактора газовой скважины, вызванного отложением солей при испарении воды. Для поздних этапов закачки газа определены критерии подобия, характеризующие максимальное расстояние распространения газа от скважины в наклоненном пласте и эффективность размещения газа. Показано, что размер области пласта, загрязненной газом, зависит от двух параметров подобия. Исследована перспективность закачки CO_2 в подземные хранилища природного газа с целью замещения буферного газа сверхкритическим CO_2 . Выполнено трехмерное моделирование в рамках расчета фильтрации смеси $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$. Предложены методы определения наиболее эффективных и рентабельных режимов применения газовых методов увеличения нефтеотдачи, предполагающих использование CO_2 в качестве вытесняющего нефть газа.

Будадин Олег Николаевич



Доктор технических наук, начальник отдела технической диагностики и неразрушающего контроля АО «ЦНИИ специального машиностроения», г. Хотьково, Московской обл. По сведениям РИНЦ - автор около 300 публикаций, число цитирований которых 1577. Имеет 35 патентов на изобретения. Член президиума Российской инженерной академии.

Развитие методов и приборов неразрушающего контроля композитных материалов

В настоящее время инструментальные методы неразрушающего контроля (НК) с оценкой ресурса эксплуатации композитных материалов (КМ) представлены достаточно слабо.

Это обусловлено практическим отсутствием технологий НК для обнаружения «неявных» дефектов в КМ, проявляющихся в процессе воздействия нагрузок («сомкнутые» трещины, расслоения и т.п.), выделения «критичных» дефектов, влияющих на функционирование изделий, оценки ресурса на основе НК и т.п.

В настоящем докладе представлены некоторые направления развития интегральных аппаратно-программных средств и методов неразрушающего контроля КМ для обеспечения их качества и оценки ресурса эксплуатации.

Решаются задачи: выделение «критичных» дефектов, оценка характеристик «минимального» дефекта для настройки приборов неразрушающего контроля по анализу реальных дефектов материала, метрологическая аттестация технологий НК, обнаружения неявных (скрытых) дефектов, не выявляемых традиционными методами, выявление, обнаружение областей концентраторов внутренних напряжений, измерение толщины диэлектрических покрытий и др.

На основе математического моделирования процессов неразрушающего контроля (взаимодействие физических полей с композитными материалами, содержащими неоднородности), теоретических и экспериментальных исследований, разработаны технологии и аппаратно-программные средства НК: ультразвуковая термотомография, электросиловая термография, оптический метод на основе ВБР, метод поверхностных потенциалов, вихретоковый метод измерения толщины на различных подложках.

Описаны подходы к оценке ресурса эксплуатации на основе искусственных нейронных сетей.

Приведены применения неразрушающего контроля в различных областях промышленности.

Файнбург Григорий Захарович



Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН, профессор кафедры "Разработка месторождений полезных ископаемых" и директор Института безопасности труда, производства и человека Пермского национального исследовательского политехнического университета. Специализируется в области охраны труда и безопасности производственной деятельности, спелеотерапии, доктор технических наук. Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, полный кавалер почетного знака «Шахтерская Слава». Автор более 850 научных трудов, в том числе 9 монографий, многочисленного ряда учебников и производственно-практических пособий, авторских свидетельств и патентов.

Проблемы цифровизации и мониторинга процессов проветривания рудников

На основе оригинальных работ автора излагаются кардинальные вопросы построения нуль-мерных, одномерных, двумерных и трехмерных математических моделей физических процессов проветривания в многосвязанной системе подземных горных выработок разных аэродинамических типов, необходимых для создания виртуального «цифрового двойника» рудничной атмосферы. Показаны различия моделирования в «элементе» текущей среды, в отдельных горных выработках, в руднике в целом, в том числе с целью мониторинга. Затронуты вопросы моделирования турбулентности, а также основных процессов рудничного проветривания – вытеснения (адвективного переноса) и смешения (вихревой диффузии). Рассмотрен метод автономизации (расщепления), позволяющий эффективно решать краевые задачи тепломассопереноса, определенные на ориентированных графах. Показана необходимость изменения действующей парадигмы проветривания и перехода на идеи «бережливого проветривания».

Исаевич Алексей Геннадьевич



Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела Аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН, доцент кафедры «Разработки месторождений полезных ископаемых» Пермского национального исследовательского политехнического университета, директор Института калия. Направление исследований: научное обоснование и разработка оптимальных систем контроля и состояния рудничной атмосферы.

Мониторинг и управление пылевой обстановкой в рабочих зонах калийных рудников

С целью увеличения объемов добычи калийной руды добывающие предприятия внедряют максимально высокопроизводительные добычные комбайны. При этом работа высокопроизводительного оборудования приводит к увеличению количества вредных примесей, выделяемых в атмосферу горных выработок при разрушении массива горных пород. Пыль, образующаяся при отбойке, транспортировке, подъеме полезного ископаемого является одной из таких «вредностей».

Борьба с калийной пылью обладает рядом особенностей не позволяющих использовать классические методы. Это диктует необходимость использования нового подхода, направленного не столько на подавление пылевого облака сколько на управление пылевой обстановкой.

В рамках данного подхода управление пылевой обстановкой связано с зонированием воздушного пространства. Предлагается зонировать пространство отдельных тупиковых комбайновых забоя. При этом появляется возможность обеспечить вытеснение загрязненного воздуха из одной зоны в другую, без достижения ПДК во всем объеме рабочей зоны. Т.е. предлагается не пытаться снизить концентрацию пыли во всем объеме рабочей зоны (к тому же это физически невозможно), а выделить зоны, в которых большую часть времени находятся машинист комбайна и самоходного вагона и поддерживать в них минимально возможную концентрацию пыли. Реализовать предложенный подход позволит использование механизма вытеснения, который в свою очередь реализуется при всасывающем проветривании. При этом применение механизма вытеснения, позволяет не допустить скопления опасных концентраций горючих и ядовитых газов.

Мастер-класс

«Геомеханическое сопровождение радарного мониторинга оседаний земной поверхности в процессе ведения горных работ»



Девятков Сергей Юрьевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Механики горных пород Горного института УрО РАН.

Контроль процесса сдвижения земной поверхности является важным элементом оценки негативного воздействия горных работ на здания, сооружения и объекты инфраструктуры. Традиционно для контроля оседаний применяются

геодезические методы, позволяющие определить значения деформаций земной поверхности на отдельных линейных участках. В последние годы широкое распространение получили площадные измерения скоростей оседаний с помощью спутниковой радарной интерферометрии.

Площадной мониторинг оседаний земной поверхности осуществляется путем анализа радарных снимков со спутников в течение благоприятного погодного периода наблюдений. Методом суммирования смещений, полученных по парным интерферограммам, выявляются области значимых оседаний земной поверхности. Через каждую из данных областей строятся профили и оцениваются максимальные амплитуды субвертикальных оседаний, связанных с подземной разработкой месторождений.

Поскольку получение адекватных оценок оседаний с помощью спутниковых снимков зачастую невозможно из-за наличия снежного или растительного покрова, исследование процесса сдвижения выполняют совместно с геомеханическим моделированием. Это позволяет как получить представление о сдвижениях за пропущенные периоды радарных наблюдений, так и оперативно скорректировать геомеханическую модель на основе актуальных данных мониторинга.

На примере Старобинского месторождения показано геомеханическое сопровождение спутникового мониторинга. Выполнено сопоставление результатов математического моделирования динамики сдвижения земной поверхности в процессе подвигания очистного забоя лавы с данными радарной интерферометрии. Использованная геомеханическая модель учитывала основные особенности строения подработанного массива, а также обрушение пород кровли отработываемого пласта с заполнением ими выработанного пространства лавы. Математическое моделирование осуществлялось в упруго-пластической постановке с численной реализацией методом конечных элементов.

Сравнение результатов математического моделирования с данными спутниковой радарной интерферометрии показало хорошую пространственную корреляция областей максимальных оседаний и согласование вида формируемых мульд сдвижения.

Выполненный анализ свидетельствует об адекватности математического описания процесса деформирования породного массива при отработке калийных руд.

Показана возможность восстановления и прогноза оседаний земной поверхности на интервалы времени, где отсутствуют данные радарной интерферометрии. Качественная радарная съемка позволяет выполнить калибровку геомеханической модели, верификацию результатов геомеханического сопровождения, а при необходимости внести уточнения в математическую модель напряженно-деформированного состояния подработанного массива.

Совместное использование результатов анализа спутниковой радарной интерферометрии и геомеханического моделирования может быть использовано на практике при анализе и прогнозе развития сдвижения земной поверхности в процессе ведения горных работ.

Мастер-класс

«Физическое моделирование процессов теплопереноса в наклонных горных выработках с интенсивными источниками тепловыделения»



Попов Максим Дмитриевич

Инженер отдела Аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в наклонных горных выработках в шахтных условиях практически невозможно. В первую очередь из-за стихийности процесса возникновения очага возгорания и как следствие невозможности заранее разместить измерительное оборудование в месте пожара. Во-вторых воздействие высоких температур которые характеризуют подземные пожары накладывает серьёзные ограничения не только на пребывание человека в подземной части рудника, но и на измерительные

приборы, которые могут быть использованы в ходе измерения.

Одним из инструментов позволяющих провести анализ процессов теплопереноса наклонной выработке при возвратных и частично-возвратных течениях, вызванных тепловой депрессией с учетом изменяемых характеристик исследуемого объекта является физическое моделирование.

В докладе рассмотрены особенности разработки и реализации испытательного аэродинамического стенда с точки зрения соблюдения условий подобия процессов теплопереноса между лабораторным стендом и реальными условиями в шахте.

29 ноября Пятница

- 10:00 - 10:45 **Турунтаев Сергей Борисович**
Сейсмичность при разработке месторождений углеводородов и геотермальных проектов
- 10:45 - 11:30 **Пантелеев Иван Алексеевич**
Пороупругий отклик геосреды на прохождение телесеismicких волн как инструмент оценки параметров трещиноватости в районе разломной зоны
- 11:30 – 11:45 Кофе
- 11:45 - 12:15 **Сероваев Григорий Сергеевич**
Мастер-класс «Особенности применения распределенных волоконно-оптических датчиков на основе рэлеевского рассеяния для измерения деформаций»
- 12:15 – 13:00 Обед
- 13:00 - 13:45 **Майер Александр Евгеньевич**
Методы машинного обучения в механике пластичности и разрушения
- 13:45 - 14:30 **Кузнецов Николай Владимирович**
Математические проблемы прогнозирования динамики систем управления: скрытые колебания, мультиустойчивость, техногенные катастрофы
- 14:30 – 14:45 Кофе
- 14:45 - 15:30 **Левин Владимир Анатольевич**
Примеры использования отечественного пакета для прочностного инженерного анализа Фидесис для моделирования в различных отраслях промышленности, включая закритические сценарии нагружения (Левин В.А., Вершинин А.В.)
- 15:30 – 16:15 **Шардаков Игорь Николаевич**
Анализ результатов многолетнего мониторинга квазистатических и динамических деформационных процессов в железобетонных и железных конструкциях
- 16:15 – 16:30 **Заккрытие работы Школы**

Турунтаев Сергей Борисович



Доктор физико-математических наук, директор Института динамики геосфер РАН. Область научных интересов: геомеханика, флюидодинамика, сейсмология, индуцированная сейсмичность. Член международного Общества поисковой геофизики (SEG), Европейской ассоциации ученых и инженеров в области наук о Земле (EAGE). По сведениям РИНЦ - автор и соавтор более 160 публикаций, которые процитированы 1050 раз.

Сейсмичность при разработке месторождений углеводородов и геотермальных проектов

Использование минеральных ресурсов сопровождается воздействием на недра. Для решения климатических проблем, помимо прочего, предлагается использование геотермальных источников энергии и закачка парниковых газов в недра. Разработка месторождений углеводородов, развитие геотермальной энергетики, захоронение опасных отходов и парниковых газов, извлечение метана из месторождений угля – все это сопровождается воздействиями на подземные флюидные системы и приводит к изменениям порового давления подземных флюидов. Изменение порового давления приводит к росту сейсмической активности в районах воздействия, к сильным и даже катастрофическим землетрясениям.

В лекции рассматриваются примеры возникновения техногенной сейсмичности, связанной с воздействием на подземные флюидные системы, даются понятия о моделях появления сейсмических событий при закачке жидкости, приводятся примеры результатов численного моделирования, лабораторных и натуральных экспериментов по изучению индуцированных сейсмических событий. Изменение порового давления жидкости описывается в рамках пороупругости. В качестве модели, описывающей движение по тектоническим разломам, выбрана модель rate-and-state, которая предполагает зависимость коэффициента трения от скорости перемещения берегов разломов и может использоваться для описания как несейсмичной, так и сейсмичной фаз скольжения. Рассматривается также возможность оценки фильтрационных свойств неоднородных коллекторов по данным об эволюции микросейсмичности с использованием методов машинного обучения.

Пантелеев Иван Алексеевич



Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов Горного института УрО РАН (г. Пермь). Область научных интересов: механика анизотропной поврежденности, теоретическая и экспериментальная геомеханика, механика разломных зон и геосред. По сведениям РИНЦ - автор и соавтор более 230 публикаций, которые процитированы 978 раз, в том числе 208 – из зарубежных журналов.

Пороупругий отклик геосреды на прохождение телесеismicических волн как инструмент оценки параметров трещиноватости в районе разломной зоны

Изучение многочисленных проявлений гидрогеосейсмических вариаций в изменениях давления, разгрузки, температуры и химического состава подземных вод и газов при вибрационном воздействии сейсмических волн на подземные водоносные системы является одним из магистральных направлений изучения последствий сильных и средних землетрясений в сейсмоактивных регионах мира. Наиболее чувствительными к такого рода воздействиям являются крупные разломы, зона динамического влияния которых может достигать сотен метров. Наличие сопутствующей трещиноватости, связанной с кинематикой основного сместителя, а также зон затрудненной миграции флюидов, определяет характер вариаций порового давления на различных глубинах в районе разломной зоны на прохождение сейсмических волн. В случаях, когда разломная зона пересекает рудное поле, коллектор углеводородов или подземное хранилище отходов различного типа, пороупругий отклик среды в ее окрестности на прохождение сейсмических волн может быть использован как индикатор ее напряженно-деформированного состояния.

В лекции будет рассмотрена эволюция теоретических представлений о пороупругом отклике флюидонасыщенной среды на прохождение сейсмических волн. Отдельный акцент будет сделан на несоответствии современных теоретических представлений и данных комплексного скважинного мониторинга, и, соответственно, обобщении известных эмпирических соотношений. На конкретном примере мониторинга резервуара сброса сточных вод Арбакл (Оклахома, США) будет продемонстрирована возможность оценки параметров трещиноватости в районе крупной разломной зоны по данным о пороупругом отклике среды на прохождение сейсмических волн от удаленных сильных землетрясений.

Мастер-класс

«Особенности применения распределенных волоконно-оптических датчиков на основе рэлеевского рассеяния для измерения деформаций»



Сероваев Григорий Сергеевич

Младший научный сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь). По сведениям РИНЦ - автор 82 публикации, которые процитированы 298 раз, в том числе 131 – из зарубежных журналов.

Достоверное измерение деформаций в различных участках контролируемой конструкции является важной задачей при создании систем мониторинга механического состояния. Для решения данной задачи большой потенциал имеют волоконно-оптические датчики (ВОД) благодаря малым

размерам, высокой чувствительности, возможности внедрения в различные материалы на этапе их изготовления. Среди ВОД набирают распространение распределенные ВОД на основе рэлеевского рассеяния, открывающие возможности для точного измерения градиентных полей деформаций с высоким пространственным разрешением. Данный тип ВОД позволяет проводить измерения деформаций в сотнях точек на протяжении тестируемого оптического волокна.

В отличие от точечных ВОД на основе волоконных брэгговских решеток, для которых длина измерительного участка фиксирована, для распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния возможен выбор оптимальной для конкретного распределения деформаций базы датчика, что позволяет увеличить точность измерения деформаций, в особенности для существенно неоднородного типа распределения деформаций.

В рамках мастер-класса будут продемонстрированы особенности измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния, связанные с выбором базы датчика, диапазона длин волн сканирования, наличием в тестируемом оптическом волокне волоконной брэгговской решетки.

Майер Александр Евгеньевич



Доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Челябинского государственного университета (г. Челябинск). По сведениям РИНЦ - автор и соавтор более 300 статей, включая 54 статьи в журналах Q1. Число цитирований которых 3412, причем из зарубежных журналов – 2182.

Методы машинного обучения в механике пластичности и разрушения

Последние годы методы машинного обучения все шире применяются в механике материалов, позволяя эффективно преодолевать узкие места классических теоретических подходов, повышая точность и общность моделей и уменьшая время вычислений. Лекция посвящена двум аспектам машинного обучения в механике материалов, а именно применению искусственных нейронных сетей для построения моделей пластичности и разрушения, а также использованию статистических методов параметризации классических моделей в виде аналитических соотношений или дифференциальных уравнений. Рассматривается применение сетей прямого распространения и рекуррентных нейронных сетей для описания упругопластического поведения и разрушения, включая уравнение состояния, пороги нуклеации дефектов, поверхности текучести и определяющее уравнение в целом. Рассматривается статистический байесовский алгоритм оптимизации параметров (обучения) моделей, в том числе с использованием эмуляторов модели. Показывается эффективность гибридных моделей материалов, сочетающих искусственные нейронные сети и «обученные» по наборам данных части в виде дифференциальных по времени уравнений.

Кузнецов Николай Владимирович



Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой прикладной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий лабораторией информационно-управляющих систем Института проблема машиноведения РАН, руководитель секции и заместитель председателя Объединенного научного совета по прикладным наукам и технологическому развитию промышленности СПБО РАН, лауреат премии Андропова РАН. Специалист в области теории управления и нелинейной динамики, основоположник теории скрытых колебаний. Его научные исследования связаны с развитием теории скрытых колебаний и устойчивости, анализом нелинейных систем управления, систем фазовой синхронизации, регулярной и хаотической динамики. По сведениям РИНЦ - автор около 570 публикаций, которые процитированы 11100 раз, причем цитирований из зарубежных журналов - 7197.

Математические проблемы прогнозирования динамики систем управления: скрытые колебания, мультиустойчивость, техногенные катастрофы

Математическое моделирование в технических системах является актуальнейшим направлением в научном и технологическом развитии любого государства, которое стремится занять лидирующие позиции в современном мире. Одной из центральных задач моделирования динамики является задача изучения переходных процессов и предельного поведения системы, когда необходимо выявить все устойчивые колебательные режимы (задача мультиустойчивости - выявление в фазовом пространстве всех аттракторов и оценка бассейнов их притяжения) или доказать отсутствие нетривиальных колебаний (задача глобальной устойчивости - выделения областей в пространстве параметров, для которых все траектории в фазовом пространстве притягиваются к стационарному множеству при различных дополнительных требованиях к переходным процессам). В мультиустойчивых системах, особенно при наличии скрытых аттракторов, можно наблюдать неожиданные переключения состояния системы к нежелательным аттракторам. Такие переключения могут приводить к катастрофическим последствиям - неожиданным изменениям климата, финансовым кризисам, выходу из строя инженерных устройств и техногенным катастрофам.

Теория скрытых колебаний открыла ряд новых возможностей определения границ устойчивости и выявления скрытых колебаний. В данной лекции эти возможности будут продемонстрированы на примерах решения следующих актуальных инженерных задач [1-5]: задача анализа поломок нефтяных буровых установок из-за изгибно-крутильных колебаний бура; задачи М.В. Келдыша о нелинейном анализе систем подавления флаттера органов управления самолетом; задача анализа определения границ устойчивости и возбуждении колебаний для центробежного регулятора с сервоприводом паровой турбины; а также при решении задачи определения устойчивости замкнутой нелинейной

динамической модели системы управления гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС; показавший возможные причины возникновения вибраций на ГЭС и техногенной катастрофы 2009 года.

1. Н.В. Кузнецов, Теория скрытых колебаний и устойчивость динамических систем”, Проект “Культура знаний, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 23.12.2023, <https://rutube.ru/video/a1484bc7c1eb519c6bf7e4ca2d6b934a/>
2. N. Kuznetsov, Invited lecture "Hidden attractors in science and technologies", Academy of Finland, 2021 (<https://www.youtube.com/watch?v=-CzGtbfj8g0>)
3. Kuznetsov N.V., Theory of hidden oscillations and stability of control systems, Journal of Computer and Systems Sciences International, 59(5), 2020, 647-668 (<https://doi.org/10.1134/S1064230720050093>)
4. Kuznetsov N.V., Lobachev M.Y., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V., Kudryashova E.V., Kuznetsova O.A., Rosenwasser E.N., Abramovich S.M., The birth of the global stability theory and the theory of hidden oscillations, Proc. of European Control Conf. (ECC-2020), St. Petersburg, 2020, 769–774 (<https://dx.doi.org/10.23919/ECC51009.2020.9143726>)
5. Dudkowski D., Jafari S., Kapitaniak T., Kuznetsov N.V., Leonov G.A., Prasad A., Hidden attractors in dynamical systems, Physics Reports, 637, 2016, 1-50 (<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.05.002>)

Левин Владимир Анатольевич



Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Вычислительной механики МГУ им. М.В. Ломоносова, (г. Москва). Заслуженный профессор МГУ, Заслуженный деятель науки РФ, первый в России ученый-механик, под чьим руководством создан промышленный пакет для прочностного инженерного анализа. Автор теория многократного наложения больших деформаций. Теория развивалась под патронатом академика Л.И. Седова. Ключевой автор и редактор 5-ти томного цикла монографий «Нелинейная вычислительная механика прочности» (Предисловие к 5-ти томному циклу монографий академика Г.И. Марчука). Автор 8 монографий и более 500 научных работ.

Вершинин Анатолий Викторович



Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Вычислительной механики МГУ им. М.В. Ломоносова, технический директор ООО «ФИДЕСИС» (г. Москва).

**Примеры использования
отечественного пакета для
прочностного инженерного анализа
Фидесис для моделирования в
различных отраслях
промышленности, включая
закрытые сценарии нагружения**

(Левин В.А., Вершинин В.А.)

Приводится структура пакета Фидесис. Отмечается, что в пакете Фидесис впервые в мире на промышленном уровне кроме метода конечных элементов (МКЭ) используется метод спектральных элементов (МСЭ). Отмечаются его преимущества перед МКЭ, включая возможность анализа сеточной сходимости без перестроения сетки, возможность использовать криволинейные элементы с переменным порядком аппроксимации,

возможность решать задачи с геометрическими дефектами (зазоры/нахлесты) между деталями в составных CAD-моделях.

Кратко обсуждаются возможности использования пакета Фидесис с привлечением технологий искусственного интеллекта.

Приводятся основы теории многократного наложения больших деформаций, реализованной в пакете Фидесис и позволяющей решать задачи с преднагрузением и многошаговым нагружением с изменением свойств материала, топологии тела и граничных условий между шагами, включая случаи закритических сценариев нагружения.

Отдельно кратко приводятся результаты расчета для математической модели нефтегазового месторождения в Западной Сибири и результаты полномасштабного сейсмического моделирования с использованием ресурсов суперкомпьютера МГУ270.

Отмечается, что такое моделирование осуществлено впервые в мире. Для численного моделирования распространения упругих волн использовался МКЭ вплоть до **10го порядка** аппроксимации по пространству, что совокупно составило около **15 млрд.** степеней свободы в математической модели. Учитываются все типы волн, возникающих в трехмерной среде: продольные, поперечные, поверхностные, обменные, дифрагированные.

Указывается, что использование МКЭ в этом случае невозможно. Для имитации реальной полевой сейсморазведки в рамках цифрового двойника месторождения необходимо было выполнить около 12000 расчетов для различных положений источника упругих волн (пунктов взрыва), что обусловило значительную вычислительную сложность задачи. Для ее решения на исследовательском уровне был создан модуль пакета Фидесис на основе массивно-параллельной реализации численного алгоритма на гибридных вычислительных платформах на основе графических процессоров.

Обсуждается возможность с привлечением технологий искусственного интеллекта создания инструментария для решения обратных задач сейсмологии.

Предлагаются слушателям различные варианты участия в развитии пакета Фидесис.

Просьба к слушателям до начала лекции:



- скачать пакет (<https://cae-fidesys.com/>),
- посмотреть руководство для пользователя (<https://cae-fidesys.com/documentations>),
- ознакомиться с примерами его использования (<https://fidesys-solvers.ru/>),
- ознакомиться с облачной версией для конструктора (<https://prove.design/>).

Шардаков Игорь Николаевич



Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН. Область научных интересов - разработка новых подходов и методов решения краевых задач механики сплошных сред; исследования термомеханических явлений в полимерных материалах при релаксационных и фазовых переходах, разработка и создание систем интеллектуального мониторинга инженерных конструкций. По сведениям РИНЦ - автор более 300 работ, которые процитированы около 1700 раз.

Анализ результатов многолетнего мониторинга квазистатических и динамических деформационных процессов в железобетонных и железных конструкциях

Одно из направлений прикладных исследований Института механики сплошных сред УрО РАН – разработка автоматизированных систем мониторинга деформационных процессов в инженерных и строительных конструкциях. Основное предназначение таких систем – обеспечение безопасной эксплуатации конструкций в течение длительного времени. Разработка подобных систем является многодисциплинарным проектом, требующим применения современных достижений в различных областях науки:

- информационные технологии для сбора, анализа, обработки, визуализации данных мониторинга;
- математические методы для создания цифрового аналога объекта мониторинга и моделирования его поведения в различных условиях нагружения;
- разработка физических соотношений для описания поведения различных конструкционных материалов (в особенности, при предельных, критических нагрузках).
- разработка эффективных способов регистрации деформационных параметров, характеризующих состояние здоровья конструкции и позволяющих оценивать вероятность развития критических сценариев.
- разработка периферийных аппаратных средств, позволяющих осуществлять сбор и передачу информации от первичных датчиков в центр компьютерной обработки и анализа данных.

Для эффективной отработки всех обозначенных задач был разработан и создан экспериментальный стенд для исследования деформационных процессов инженерных конструкциях. Стенд позволяет исследовать поведение крупномасштабных модельных конструкций при статическом и динамическом нагружении и наблюдать широкий спектр деформационных процессов от упругого деформирования до полного разрушения объекта. Эксперименты на стенде нацелены на поиск предвестников появления критических деформационных процессов и прогнозирование динамики их развития.

На основе многолетнего опыта исследований был разработан и создан ряд авторских систем автоматизированного мониторинга, нашедших применение на реальных объектах:

- Система контроля целостности трубопровода на участке магистрального газопровода длиной 3 км (Пермский край, 2008г.);
- Система контроля целостности несущих конструкций коммунального моста через р. Кама (г. Пермь, 1996);
- Система контроля деформационного состояния 5-этажного жилого дома, расположенного в карстovoопасном районе (г. Кунгур, 2009);
- Система контроля деформационных процессов, реализовавшихся при реконструкции и эксплуатации торгово-развлекательного комплекса «Семья» (г. Пермь, 2011-2024 гг.)
- Система мониторинга деформационных процессов в элементах надшахтного здания скипового ствола с копром на территории горно-обогажительного комплекса (г. Петриков, Беларусь, 2020-2024 г.г.)
- Распределенная система мониторинга, синхронно контролирующая деформационные процессы в 38 многоэтажных жилых и общественных зданиях, расположенных на территории, подверженной влиянию подземных горных выработок (г. Березники, 2014-2024 г.г.).

Многолетнее использование разработанных систем автоматизированного мониторинга продемонстрировало их экономичность и надежность. Их применение позволяет оценивать безопасность конструкции и прогнозировать возможность возникновения и развития критических сценариев, приводящих к опасным изменениям в состоянии конструкций и их разрушению.



Пермь, набережная, 2024г.