

VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» (предисловие)

Галимзянов М.Н.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения», посвященная 25-летию со дня основания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук, и школа молодых ученых «Газовые гидраты — энергия будущего» проведены в г. Уфе в период со 26 по 30 июня 2017 года на базе отдыха «Павловка».

Организатором конференции выступил Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН при поддержке Федерального агентства научных организаций (ФАНО России), Российской академии наук (РАН), Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (ОЭММ-ПУ РАН), Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Академии наук Республики Башкортостан (АН РБ).

Заседания проходили в конференц-зале БО «Павловка». Сделано 8 лекционных сорокаминутных докладов, 25 секционных двадцатиминутных докладов с последующим обсуждением результатов исследований и 94 стендовых доклада.

После открытия конференции с докладом об истории создания и становлении института выступил временно исполняющий обязанности директора к.ф.-м.н. **Марат Назипович Галимзянов**. В докладе были отмечены основные направления деятельности института и достаточно подробно представлены научные достижения сотрудников. Особое внимание было уделено исследованиям, резуль-

таты которых представляются приоритетными для института. К ним, в частности, относятся:

- динамическая устойчивость и колебания в задачах взаимодействия конструкций с рабочими средами;
- теория идентификации краевых условий и диагностика технических систем;
- интеллектуальные системы планирования траекторий группы мобильных роботов;
- кумуляция энергии при сверхсильном сжатии парогазовых пузырьков в акустических полях и влияние эволюции искажений сферической формы пузырька на достижение предельно высоких значений давления и температуры внутри пузырька;



ВрИО директора ИМех УНЦ РАН
Марат Назипович Галимзянов

- широкодиапазонные термодинамически согласованные уравнения состояния воды и органических соединений;
- динамика пузырьковых кластеров и структурообразование при акустической кавитации;
- автомодельное схождение ударных и детонационных волн по теплопроводному газу;
- симметричный анализ дифференциальных уравнений механики и решения с линейным полем скоростей для уравнений газодинамического типа;
- гидродинамика аномально термовязких сред в неоднородном температурном поле;
- теплофизика процессов разложения газовых гидратов и создание теоретических основ технологии извлечения углеводородного сырья на шельфе;
- течение дисперсных систем в капиллярах и эффект динамического запираания.

В области инновационных исследований созданы:

- инструментарий микроробототехнических систем для автоматизации микроманипуляторных операций;
- аппаратно-программный измерительный комплекс для реконструкции обстоятельств дорожно-транспортных происшествий.

В заключение докладчик сформулировал ряд новых перспективных направлений, в рамках которых будут проводиться исследования. Одним из таких направлений является изучение микромасштабных течений в приложении к задачам биологии, медицины и новых технологий.

С докладом «Динамика и акустика полидисперсных газочапельных и пузырьковых сред. Теория и эксперимент» выступил **член-корреспондент РАН Дамир Анварович Губайдуллин** (Казань, Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН). В докладе подчеркивалось значение исследований о распространении слабых волн в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых средах с фазовыми превращениями. Представлены разработанные математические модели, полученные дисперсионные соотношения, а также изучены высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждалась область применимости развитых теорий. Показана хорошая согласованность представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными



Член-корреспондент РАН
Дамир Анварович Губайдуллин

других авторов. Во второй части доклада были представлены результаты экспериментальных исследований нелинейных колебаний газозвесей и динамика частиц в трубах в ударно- и безударно, а также в переходном волновом режимах. Показан резонансный характер осаждения капель от частоты колебаний и возможность эффективного акустического осаждения наиболее проблемных субмикронных капель.

Задача о распространение линейных волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем была рассмотрена в докладе **профессора Амира Анваровича Губайдуллина** (Тюмень, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики



Д.ф.–м.н., профессор
Амир Анварович Губайдуллин

им. С.А. Христиановича СО РАН). Группой под его руководством исследуются в линейном приближении закономерности распространения волн давления в цилиндрической полости в пористой среде с гидратосодержащим слоем. В ходе исследований были получены дисперсионные соотношения для основной акустической моды в цилиндрической полости в каждом слое, составляющем пористую среду. На основе данных соотношений рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения волн через границы слоев. Изучено влияние свойств пород, частоты сигнала и протяженности гидратосодержащего слоя на суммарный коэффициент отражения от слоя. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы при интерпретации скважинных данных для уточнения положения границ слоев, пересекаемых скважиной, в частности, гидратосодержащего слоя.

Дифференциальная механика жидкостей — раздел механики сплошных сред, в котором динамика и структура течений согласованно изучаются теоретически и экспериментально на основе фундаментальной системы уравнений. Среда характеризуется набором материальных параметров — термодинамических (потенциалы и уравнения состояния), кинетических (коэффициенты молекулярного переноса) и физически обоснованными граничными и начальными условиями. Для адекватного описания формирования так называемой «тонкой структуры» течений неоднородных и многофазных жидкостей в докладе **профессора Юлия Дмитриевича Чашечкина** (Москва, *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*) предложена фундаментальная система, включаю-

щая дифференциальные уравнения неразрывности, баланса импульса, энтропии (энергии), концентрации составляющих веществ, которая анализируется с учетом условия совместности, задающего ранг нелинейной системы, порядок ее линеаризованной версии и степень характеристического (дисперсионного) уравнения, определяющие число независимых функций в полном решении. Непрерывные вещественные или комплексные функции полного решения позволяют провести классификацию моделей, определить временные и пространственные масштабы, задающие адекватные требования к методикам численного или лабораторного моделирования. Универсальность подхода позволяет в единой постановке провести согласованные аналитические, численные и лабораторные исследования процессов свободной многокомпонентной конвекции, включающих течения, индуцированные диффузией на топографии; генерации и распространения внутренних волн; обтекания двух- и трехмерных препятствий; растекания падающей в жидкость капли и сопутствующей генерации звука в широком диапазоне параметров, включающем традиционные ламинарные, переходные и турбулентные режимы.

Явление кумуляции при сжатии кавитационных пузырьков в жидкости на поверхности твердого тела было рассмотрено в докладе **профессора Александра Алексеевича Аганина** (Казань, *Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН*). В его докладе озвучены проблемы, применение и механизмы разрушительного воздействия кавитации на поверхности тел. Приведены основные положения методики расчета импульсного воздействия кавитационных пузырьков на тело посред-



Д.ф.–м.н., профессор
Юлий Дмитриевич Чашечкин



Д.ф.–м.н., профессор
Александр Алексеевич Аганин

ством высокоскоростных кумулятивных струй. Методика состоит из трех этапов. На первом этапе методом граничных элементов рассчитываются параметры струи в начале ее удара по телу или в слое жидкости между пузырьком и телом. На втором этапе определяется нагрузка на поверхность тела, расчет которой осуществляется методом конечных разностей без явного выделения контактной границы «жидкость–газ» с применением динамически адаптивных сеток. На третьем этапе методом С.К. Годунова рассчитываются динамика приповерхностного слоя тела и малые деформации его поверхности. Представлены примеры расчетов, иллюстрирующие эффективность используемых на каждом этапе численных методов. Для демонстрации работоспособности методики в целом показаны результаты расчета импульсного воздействия на тело примыкающего к его поверхности кавитационного пузырька.

Схождение пузырька может сопровождаться потерей устойчивости его первоначальной сферической формы. Наличие поверхности натяжения на границе раздела «газ (пар)–жидкость» аналогична задаче о потери устойчивости сферической оболочки. Потеря устойчивости цилиндрических оболочек при динамическом обжатии рассмотрена М.А. Лаврентьевым и А.Ю. Ишлинским (1949), а устойчивость границы раздела «газ–жидкость» при ударно-волновом нагружении — Р. Рихтмайером (1960) и Е.Е. Мешковым (1969). На конференции был представлен обстоятельный доклад члена-корреспондента РАН Марата Аксановича Ильгамова (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН), в кото-

ром излагались результаты, обобщающие предыдущие исследования. Для постановки обобщенной задачи в статической формулировке вначале была рассмотрена задача о взаимодействии неустойчивостей Эйлера и Рэлея–Тэйлора. Расчетная схема представлялась по аналогии с задачей о продольно-поперечном изгибе балки, но, при этом находящейся на границе двух жидкостей с различными плотностями. Построены области устойчивости и предельные значения критических нагрузок, соответствующие критериям Эйлера и Рэлея–Тэйлора. Далее, уже в динамической постановке, была решена обобщенная задача о взаимодействии неустойчивостей Лаврентьева–Ишлинского и Рихтмайера–Мешкова. Также рассматривались все предельные случаи поведения системы.

В докладе профессора Салавата Валеевича Хабирова (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН) проанализированы законы сохранения для вязкой жидкости. Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости записаны в дивергентном виде (законы сохранения). Уравнения допускают бесконечномерную алгебру Ли операторов. В ходе доклада было показано, что по каждому базисному оператору построен нетривиальный закон сохранения. Новые законы сохранения можно получить вычислением производящих операторов. Порядок закона сохранения совпадает с порядком производных, входящих в координаты производящих операторов. Нетривиальные законы сохранения, полученные по допускаемым операторам, — первого порядка. Вычислены производящие операторы нулевого порядка. Обсуждается проблема вычисления всех



Член-корреспондент РАН
Марат Аксанович Ильгамов



Д.ф.-м.н., профессор
Салават Валеевич Хабиров



Д.ф.-м.н., профессор
Николай Алексеевич Прибатурин

возможных производящих операторов первого порядка.

Структурам двухфазового потока в теплогидравлике ядерных реакторов был посвящен доклад, представленный профессором Николаем Алексеевичем Прибатуриним (Новосибирск, Тюменский филиал Института проблем безопасности развития атомной энергетики РАН). Результаты экспериментальных исследований структуры двухфазного течения в ячейке между тепловыделяющими элементами показывают, что в потоке жидкости образуются как мелкие пузырьки газа, так и крупные удлиненные газовые образования, полностью перекрывающие поперечное сечение ячейки. Интересно отметить, что проведенные измерения азимутального распределения газосодержания вокруг центрального стержня указывают на слабый обмен газом между ячейками. Показано также, что ввод в канал перемешивающих решеток приводит к перераспределению газа в сечении канала по сравнению с дистанционирующей решеткой. За решетками происходит дробление крупных пузырей газа, при удалении от решеток изменения размеров пузырей не зарегистрировано. С использованием программных продуктов вычислены значения газосодержания в сборках с использованием решеток различного типа.

О фильтрационных волнах давления в трещине, находящейся в пористой и проницаемой среде, сделан доклад авторов академика АН РБ, профессора Владислава Шайхулагзамовича Шагапова (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН) и Зили Мунирновны Нагаевой (Уфа, Уфимский

государственный нефтяной технический университет). Авторами разработана теоретическая модель, описывающая фильтрационные волны давления в трещине, находящейся в пористой и проницаемой среде, изучено распространение гармонических и импульсных сигналов. Проанализировано влияние коллекторских характеристик пласта и трещины (например, их пористости, проницаемости и ширины трещины), а также реологических свойств насыщающего флюида на динамику распространения сигналов в трещине. Установлено, что трещина в пористом и проницаемом пласте является своеобразным волновым каналом для низкочастотных колебаний давления в скважинах.

Получены аналитические решения, описывающие эволюцию полей давления в трещине при внезапном повышении давления в скважине на постоянную величину, а также для нагнетания (или отбора флюида) с постоянным объемным расходом. На основе этих решений установлены соответствующие закономерности от времени для расхода флюида и граничного давления.

О проявление анизотропии при течении эмульсий и крови в микроканалах с сужением в своем докладе сообщил к.ф.-м.н. Альфир Тимирзянович Ахметов (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН). Под его руководством рассмотрено течение эмульсий, их частичная деструкция и динамическое запираание. Показано, что условия течения в сосуде со стенозом являются аномальными по отношению к течению крови в сосудистой системе здорового организма. Разработано микрожидкостное устройство для физического моделирования аномальных условий



Зиля Мунирновна Нагаева



К.ф.-м.н. Альфир Тимирзянович Ахметов

течения биологической дисперсии и приведены результаты экспериментальных исследований. Рассмотрены случаи проявления анизотропных свойств крови при движении в микроканалах, которые повышают вероятность тромбообразования.

При бурении скважин традиционным методом давление в открытом стволе принято поддерживать выше пластового. Это позволяет предотвратить проникновение газа или жидкости из пласта в скважину. Однако, при слишком высоком давлении могут произойти разрушение пласта и утечка бурового раствора. С уточнением модели течения газожидкостной смеси в скважине выступил **к.т.н., с.н.с. Вадим Семенович Тихонов** (Москва, Weatherford). Он сообщил, что современный метод бурения с управлением давлением в



К.т.н., с.н.с. Вадим Семенович Тихонов

затрубном пространстве на выходе из скважины позволяет избежать проблемы путем поддержания давления в скважине выше пластового давления и давления обрушения (коллапса) породы и ниже давления гидроразрыва. Эффективность бурения за счет использования более легких растворов при этом повышается. Одной из главных задач при бурении таким методом является контроль объема газа, попавшего в скважину из пласта. В этой связи большое значение приобретает математическое моделирование, позволяющее оценить мощность выброса заблаговременно, чтобы успеть приложить противодавление в скважине до выхода газа на поверхность.

В докладе рассмотрена уточненная модель приведенного дрейфа (Drift-Flux Model, DFM), включающая уравнения баланса масс газа и жидкости по отдельности и единого для газожидкостной смеси уравнения баланса импульса. Указанная модель получила достаточно широкое распространение, однако ее адекватность во многом определяется замыкающими соотношениями.

Для повышения эффективности решения исходные уравнения DFM были преобразованы путем введения лагранжевой массовой координаты. Это позволило ограничить область определения задачи только массой поступившего в скважину газа, несмотря на изменение протяженности загазованной области по мере подъема в скважине. Для численного решения уравнений используется явная схема Годунова. Предложенный подход позволил разработать программу, оценивающую эволюцию загазованной области от точки выброса в многократно ускоренном масштабе.

В последние годы, главным образом из-за снижения продуктивности нефтенасыщенных пластов, в процессе разработки месторождений многие нефтяные скважины эксплуатируются в периодическом режиме, когда погружной насос работает не постоянно, а с периодами выключения. Таким образом удается добиться того, чтобы дебит скважины во время работы насоса соответствовал его номинальной производительности, а стало быть риск отказа оборудования или снижения его коэффициента полезного действия были минимальными. Однако, при периодическом режиме работы насоса возникают сложности, связанные с высокой погрешностью замера дебита скважины, которые ограничивают возможности оптимизации режима скважины в промысловых условиях. В этом случае на помощь приходит математическое моделирование. Об оптимизации работы периодического режима нефтяной скважины с помощью методов математического моделирования выступил **к.ф.-м.н. Андрей**



К.ф.-м.н. Андрей Сергеевич Топольников



К.ф.-м.н. Альфред Ядгарович Давлетбаев

Сергеевич Топольников (*Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН*). В докладе представлено описание математических моделей элементов скважины, насоса и призабойной зоны пласта, которые позволяют описать нестационарные процессы, связанные с движением многофазного потока в пласте, обсадной колонне, насосе, колонне насосно-компрессорных труб и затрубном пространстве скважины. Приводится обсуждение адекватности применения квазистационарной модели. На примере ряда скважин проводятся моделирование текущего и поиск оптимального режима эксплуатации скважин в периодическом режиме.

Вопросы численного моделирования и анализа промысловых данных нагнетательных тестов при гидравлическом разрыве пласта были подняты в докладе **к.ф.-м.н. Альфреда Ядгаровича Давлетбаева** (*Уфа, ООО «РН-УфаНИПИнефть»*). Представлена математическая модель, которая позволяет описать распределение давления, раскрытия трещины и др. в системе «техногенная трещина–низкопроницаемый продуктивный пласт». Магистральная трещина гидроразрыва пласта (ГРП) изменяет свою геометрию (раскрытие, длину) при нагнетательных тестах с закачкой жидкости в скважину при давлениях выше минимального горизонтального напряжения. Полагается, что высота техногенной трещины равна высоте продуктивного пласта и не меняется во времени. Трещина имеет эллиптическое сечение, т.е. рассматривается модель (РКН) Перкинса–Керна–Нордгрена. Также рассмотрены и проанализированы примеры промысловых нагнетательных тестов при ГРП в низко- и сверхнизкопроницаемых коллекторах.

Актуальным на сегодняшний день вопросом повышения эффективности добычи углеводородов является вопрос о борьбе с солеотложением на погружном оборудовании при эксплуатации скважин. Солеотложение катализирует износ глубиннонасосного оборудования, приводит к незапланированным тратам на ремонт скважин, разбор и чистку аппаратуры. Все это в совокупности значительно ухудшает экономические показатели работы нефтегазодобывающих предприятий. Задачам исследования процессов солеотложения на элементах погружного нефтедобывающего оборудования при электромагнитном воздействии был посвящен доклад **к.т.н. Расуля Рашитовича Зиннатуллина** (*Уфа, Башкирский Государственный Университет*). Одним из решений данной проблемы, не требующей боль-



К.т.н. Расуль Рашитович Зиннатуллин

ших затрат, является обработка флюида электромагнитным полем. Способ этот уже применяется, но лишь частично, так как до конца механизм воздействия электромагнитного излучения еще не изучен. Данная проблема заставляет комплексно подходить к ее решению. Необходимо знание физико-химических процессов, протекающих в скважине при электромагнитном воздействии, связанных с солеотложением; причин солеотложения и факторов, способствующих ему. Основным направлением борьбы с солеотложениями должно стать их предупреждение как постоянно действующая мера, что требует системного подхода. Для подробного изучения влияния электромагнитного поля на процессы солеотложения был собран лабораторный стенд, который предусматривал обработку раствора соленой воды электромагнитным полем и отложение солей в свидетеле при заданной температуре. Анализировались образцы раствора до и после обработки электромагнитным полем, а также образцы выпавших осадков. Были проведены испытания нескольких видов излучателей и по результатам анализов были определены наиболее эффективные. Распространение детонационных волн в пузырьковых средах является уникальным физическим явлением: во-первых, удельно-массовая калорийность пузырьковой жидкости на шесть и более порядков ниже, чем обычных твердых, жидких и газообразных взрывчатых веществ (ВВ); во-вторых, с увеличением объемного содержания взрывчатого газа, т.е. с увеличением калорийности пузырьковой смеси, происходит уменьшение скорости детонационной волны, что не свойственно детонационному процессу для обычных ВВ. Параметры волн детонации не зависят от способа инициирования, а определяются только свойствами среды. Распространение волн в пузырьковой системе является диссипативным процессом, но энергетические потери волны детонации компенсируются химической энергией, содержащейся в пузырьковой среде.

Особенностям динамики детонационных волн в неоднородной пузырьковой жидкости был посвящен доклад **д.ф.-м.н. Ильяс Кадировича Гималтдинова** (*Уфа, Уфимский нефтяной технический университет*). Системы «инертная жидкость + пузырьки взрывчатого газа» (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) называются системами I типа, пузырьковая смесь «взрывчатая жидкость + пузырьки окислителя» (минеральное вакуумное масло VM-3 с пузырьками кислорода) — системой II типа. В докладе были освещены результаты исследований волнового движения в неоднородной пузырьковой жидкости II типа, где неоднородность



Д.ф.-м.н. Ильяс Кадирович Гималтдинов

обусловлена тем, что область расчета поделена на две зоны: в первой зоне жидкость является вакуумным маслом VM-3, а во второй — водоглицериновым раствором. Построена карта возможных ситуаций возникновения взрыва на границе между областями. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных.

О нагнетании гидратообразующего газа в пласт снега, насыщенный тем же газом, в своем докладе рассказала **к.ф.-м.н. Ангелина Сергеевна Чиглинцева** (*Бирск, Бирский филиал Башкирского государственного университета*). Автором решена задача о нагнетании гидратообразующего газа (метана) в снежный массив, в исходном состоянии поры которого насыщены тем же газом. Построены автомодельные решения, описывающие по-



К.ф.-м.н. Ангелина Сергеевна Чиглинцева



К.ф.-м.н. Айдар Мартисович Ильясов

ля температур и давлений, а также распределения насыщенностей снега, воды, гидрата и газа в массиве. Показано, что при образовании гидрата, в зависимости от исходного термобарического состояния системы «снег + газ», а также интенсивности нагнетания газа, можно выделить различные характерные зоны в области фильтрации. Установлено, что с ростом давления нагнетания газа объемная зона образования гидрата увеличивается.

В докладе **к.ф.-м.н. Айдара Мартисовича Ильясова** (Уфа, ООО «РН-УфаНИПИнефть») говорилось о численном решении уравнений модели развития трещины ГРП гиперболического типа. Моделируется процесс развития трещины ГРП, инициируемый закачкой ньютоновской жидкости в пласт при давлениях, превышающих давление разрушения породы. Для моделирования рассматриваемого процесса используется обобщение модели РКН (Перкинса–Керна–Нордгрена) гиперболического типа. Численное решение уравнений модели проводится методом С.К. Годунова первого порядка точности с использованием точного решения задачи о распаде произвольного разрыва уравнений представленной модели без диссипативных членов. Численно исследовано влияние проницаемости породы и минимального горизонтального напряжения в породе на длину и ширину образующейся трещины ГРП. Проведено сравнение полученных численных решений с численным решением классической модели РКН параболического типа.

Вопросам математического моделирования процесса разложения газового гидрата в пласте на газ и лед был посвящен доклад **д.ф.-м.н. Наиля Габсалямовича Мусакаева** (Тюмень, Тюменский филиал Института теоретической

и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН). Для изучения процесса диссоциации газового гидрата при отборе газа в случае отрицательной (меньше 0°C) начальной температуры пласта на основе методов и уравнений механики многофазных сред предложена математическая модель неизоэнтальпической фильтрации газа с учетом фазовых переходов. Построен алгоритм решения предложенной математической модели с использованием неявной разностной схемы, метода прогонки, метода простых итераций и метода энталпий для учета фазового перехода «гидрат–газ и лед»; разработана вычислительная программа. Исследованы особенности диссоциации газового гидрата в зависимости от забойного давления, абсолютной проницаемости и начальной температуры пласта. Расчетным путем показано, что в зависимости от условий на забое скважины реализуются различные варианты фильтрации газа: без процесса разложения газового гидрата, с фронтальной поверхностью фазовых переходов, с формированием протяженной (объемной) области диссоциации гидрата.

Математическое моделирование СВЧ электромагнитного воздействия на эмульсионные системы было освещено в докладе **к.ф.-м.н. Айрата Ахматовича Мусина** (Уфа, Башкирской государственной университет). Рассматриваются тонкодисперсные и коллоидно-дисперсные эмульсионные системы, в которых гравитационное осаждение капель практически невозможно. Размеры капель настолько малы, что в таких системах преобладают межмолекулярные силы. При этом определяющую роль будет играть соотношение между совокупностью всех сил, действующих на капли. Для опре-



Д.ф.-м.н. Наиль Габсалямович Мусакаев

деления эффективности СВЧ ЭМ воздействия на водонефтяные эмульсии предлагается неизотермическая математическая модель, записанная в диффузионном приближении, с учетом свободноконвективных течений жидкости, возникающих в среде при изменении ее температуры и концентрации капель воды в несущей фазе. Диссипация энергии СВЧ поля моделируется в виде распределенных источников тепла, значения которых зависят от концентрации капель воды в эмульсии. Считается, что сферические капли не меняют свою форму и имеют одинаковый размер. Слияние капель не учитывается. Задача решается с использованием открытого программного пакета «OpenFOAM». Показано, что под действием СВЧ поля возникает тепловая конвекция в жидкости, которая при определенном соотношении параметров среды может препятствовать осаждению капель.

Вопросам взаимодействия слабонесферических газовых пузырьков в жидкости в трехмерной постановке задачи был посвящен доклад **к.ф.-м.н. Анаса Ильгизовича Давлетшина** (Казань, Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН). В ходе исследований были рассмотрены гидродинамические взаимодействия слабонесферических газовых пузырьков в жидкости в акустическом поле в трехмерной постановке задачи. Для описания совместной динамики пузырьков используется полученная методом сферических функций система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно радиусов пузырьков, радиус-векторов их центров и векторов, характеризующих отклонение поверхности пузырьков от сферической. Учитывается влияние поверхностного натяжения, вязкости и сжимаемости жидкости. Газ в пузырьках принимается однородным, с давлением, изменяющимся по адиабатическому закону. Приводится ряд результатов расчета, иллюстрирующих влияние трехмерного гидродинамического взаимодействия на поступательное движение и малые деформации пузырьков.

О возникновении ударных волн в кавитационном пузырьке при коллапсе в своем докладе сообщил **к.ф.-м.н. Дмитрий Юрьевич Топорков** (Казань, Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН). Проведены исследования ряда сред относительно возникновения сходящихся ударных волн в полости коллапсирующего кавитационного пузырька при различных давлениях жидкости. Показано чередование этих сред по степени благоприятствования образованию ударных волн и, как следствие, наиболее сильному сжатию среды в пузырьке. Сделана оценка минимального значения давления жидкости, при котором в пузырь-

ке возникает ударная волна. Для некоторых сред проиллюстрировано удовлетворительное согласование полученных результатов с результатами прямого численного моделирования коллапса пузырька с использованием полной гидродинамической модели и широкодиапазонных уравнений состояния, с учетом неравновесных испарения–конденсации на межфазной границе и нестационарной теплопроводности в паре и жидкости.

С докладом о термодинамических аспектах течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры выступил **д.ф.-м.н. Саид Федорович Урманчеев** (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН). В исследованиях, проведенных авторами ранее, были обнаружены такие особенности течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры, которые позволили классифицировать их как существенное дополнение к общей картине течения жидкостей с постоянной вязкостью или вязкостью, меняющейся по аррениусовскому закону. В данном докладе были представлены новые результаты, основанные на включении в математическую модель термодинамических потенциалов. Целью исследования являлось математическое описание течения полимерных жидкостей в неоднородном температурном поле вблизи стенок канала. Кроме того, показаны результаты по исследованию режимов установления потока полимерной жидкости.

Высокими эффективностью и надежностью отличаются способы решения задач, базирующиеся на использовании коллективов (групп) роботов. Для проявления новых функциональных возможностей коллектива необходимо не только увеличить количество агентов, но и разработать такую среду «жизнедеятельности», которая бы на аппаратно-программном уровне поддерживала такой коллектив. С докладом о структурной поддержке функционирования распределенного коллектива роботов выступил **д.т.н. Олег Владимирович Даринцев** (Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН). Автором отмечено, что решение данной проблемы видится в широком использовании методов искусственного интеллекта и облачных технологий, которые изначально строятся на базовых технологиях распределенных вычислений и обладают развитыми средствами диспетчеризации потоков, контроля исполнения и механизмами разрешения конфликтов. В докладе раскрывается архитектура (структура) системы управления коллективом роботов, учитывающая специфические особенности области применения, решаемых задач и используемых методик, а также рассматриваются способы делегирования полномочий отдельным агентам (ро-



Общая фотография участников

ботам), распределения информационных потоков и устранения коллизий. Показано влияние выбранных аппаратно-программных решений на конечную реализацию выбранной структуры.

О стационарной скорости волны фильтрационного горения газов при подобию полей температуры и концентрации рассказал в своем докладе **к.ф.-м.н. Марух Махмудович Кабилов** (*Душанбе, Российско-Таджикский (славянский) университет*). В докладе рассматривается одностационарная математическая модель распространения стационарной волны фильтрационного горения газов при подобию полей температуры среды и концентрации недостающего компонента. Получены связь между функциями температуры и концентрации, а также уравнение для численного расчета распределения температуры. Численные расчеты проведены для разных составов водородо-воздушной смеси газов и выяснено их влияние на характеристики волны. Изучены зависимости скорости волны, равновесной температуры, характерного размера зоны горения и коэффициента диффузии недостающего компонента от скорости вдува газа.

Презентации секционных докладов проходили по следующим разделам: «Механика многофазных сред», «Вычислительные методы в механике», «Взаимодействие конструкций с рабочими средами», «Динамика образования и разложения газовых гидратов», «Функционирование робототехни-

ческих систем с учетом специфики окружающей среды».

Отмечено успешное проведение конференции как в научном плане, так и в организационном. Произошел обмен мнениями по ряду ключевых проблем механики многофазных систем и намечены основные пути дальнейшего ее развития.

Участники приветствовали установившуюся традицию проведения Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения».

Сочтено целесообразным проведение следующей конференции по многофазным системам каждые два года.

Ознакомиться с материалами конференции можно в [1].

Избранные статьи по результатам конференции будут опубликованы в электронном научном журнале «Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН» (<http://proc.uimech.org/>, ISSN: 2542-0380).

Список литературы

- [1] Тезисы докладов VI Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты – энергия будущего» (Уфа, 26–30 июня 2017 г.). Уфа: Нефтегазовое дело, 2017. 126 с.