



ISSN: 2658–5782

Номер 1–2

2022

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





К тридцатилетию со дня основания Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

Галимзянов М.Н.

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

Из истории Института

Инициатива создания в Уфе академического института в области механики принадлежала выдающемуся ученому и организатору науки и высшей школы России, члену-корреспонденту РАН Рыфату Рахматулловичу Мавлютову.

Институт механики Уфимского научного центра РАН был организован Постановлением Президиума РАН № 208 от 23 июня 1992 года по представлению Президиума Уральского отделения РАН. Постановление было подписано Президентом Российской академии наук академиком Ю.С. Осиповым и Главным ученым секретарем РАН академиком И.М. Макаровым. В Постановлении отмечалась необходимость развития исследований в области механики, диктуемая потребностями научно-технического обеспечения южной части Уральского региона. В качестве основных направлений научной деятельности Института были обозначены:

- деформирование элементов конструкций из упругих и упруговязкопластических материалов при сложном нагружении;
- нестационарные процессы в гетерогенных средах с физико-химическими и структурными превращениями;
- нелинейные механические системы со многими степенями свободы и синтез многосвязных многофункциональных систем управления.

В том же Постановлении директором Института механики был назначен член-корреспондент РАН Р.Р. Мавлютов.

Институт механики создавался на базе профильных научно-исследовательских подразделений Башкирского научного центра Уральского отделения РАН и Уфимского авиационного института.



Рис. 1. Член-корреспондент Российской академии наук Рыфат Рахматуллович Мавлютов

В целях увековечивания памяти видного ученого в области прикладной механики и процессов управления в технических системах, инициатора создания и директора–организатора Института механики Уфимского научного центра РАН (1992–2000 гг.), Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, члена-корреспондента РАН Рыфата Рахматулловича Мавлютова Президиум Российской академии наук постановлением № 19 от 31.01.2012 г. присвоил Институту механики УНЦ РАН имя члена-корреспондента РАН Р.Р. Мавлютова.

Более подробно с основными направлениями деятельности и достижениями сотрудников Института с 1992 по 2016 годы можно ознакомиться в [1–4].

Институт сегодня

На сегодняшний день в состав Института механики входят пять научных лабораторий:

1. Механика многофазных систем.
2. Механика твердого тела.
3. Дифференциальные уравнения механики.
4. Робототехника и управление в технических системах.
5. Экспериментальная гидродинамика.

За последние 5 лет сотрудниками Института получено много новых фундаментальных результатов. Отметим некоторые из них.

Лаборатория «Механика многофазных систем»

Заведующий лабораторией, заслуженный деятель науки РБ, д.ф.-м.н., профессор С.Ф. Урманчеев

Разработана двухтемпературная двухфазная модель газо-парожидкостной смеси с учетом парообразования, конденсации и межфазного теплообмена в односкоростном однодавленческом приближении в одномерной сферическо-симметричной и двумерной осесимметричной постановках. Численная реализация моделей осуществлена методом сквозного счета с использованием подвижных лагранжевых сеток (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.А.).

Проведено исследование нестационарного процесса истечения вскипающей жидкости при мгновенной разгерметизации сосуда высокого давления через тонкое сопло. Изучено влияние начального радиуса и числа микропузырьков на ин-



Рис. 2. Заслуженный деятель науки РБ, д.ф.-м.н., профессор Саид Федорович Урманчеев

тенсивность парообразования, оказывающих существенное влияние на процесс формирования пароводяной струи в условиях выбранных экспериментов (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.А.).

Представлены результаты численного моделирования процесса распространения сферической ударной волны, инициируемой сферическим взрывом в водной пене с использованием предложенной модели газожидкостной пены, учитывающей межфазный контактный теплообмен. Установлено, что учет теплообмена приводит к снижению амплитуды давления за счет понижения температуры газовой фазы и, как следствие, к замедлению скорости фронта ударной волны (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.А.).

Изучены фильтрационные волны давления в трещинах, находящихся в пористой и проницаемой среде. 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. Показано, что трещина в пористом и проницаемом пласте является своеобразным волновым каналом для низкочастотных колебаний давления в скважинах (Шагапов В.Ш.).

Получены точные решения, описывающие эволюцию полей давления в трещине при внезапном изменении давления в скважине на постоянную

величину. На основе этих решений установлены соответствующие закономерности для расхода флюида от времени и граничного давления. Таким образом, трещина в пористой среде является волновым каналом для низкочастотных колебаний давления в призабойной зоне скважины. Все это, в свою очередь, позволяет диагностировать результаты гидроразрыва посредством гидропрослушивания. Кроме того, полученные аналитические решения, соответствующие постоянному перепаду давления, могут быть использованы для интерпретации результатов ГИС (Шагапов В.Ш.).

Аналитически решена задача о росте слоя гидрата при контакте гидратообразующего газа и воды для двух предельных режимов. В первом режиме рост слоя гидрата определяется его пропускной способностью. При этом процесс образования гидрата происходит в изотермическом режиме. При большой пропускной способности гидрата, которая зависит от коэффициента диффузии, скорость увеличения толщины слоя гидрата определяется способностью воды и гидрата отводить тепло с поверхности, на которой образуется гидрат. Получены критические условия для приведенных коэффициентов диффузии и проницаемости слоя гидрата, соответствующие этим двум режимам гидратообразования при контакте газа и воды (Шагапов В.Ш.).

При численном решении системы уравнений, описывающей гидродинамическую устойчивость термовязких жидкостей, обнаружены значительные различия между спектрами собственных значений для течения термовязкой жидкости и жидкости с постоянной вязкостью. Показано, что учет температурной зависимости вязкости жидкости оказывает существенное влияние на значение критического числа Рейнольдса, характеризующего предельное значение устойчивости ламинарного течения жидкости. Эти значения экспоненциально убывают с ростом показателя экспоненты в функциональной зависимости вязкости от температуры. Следует отметить, что при осреднении указанной зависимости волновые числа остаются практически постоянными в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса для различных значений показателя экспоненты. В случае термовязких жидкостей наблюдается уменьшение величины волнового числа с ростом критического числа Рейнольдса.

Для жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры, в зависимости от числа Нуссельта, исследованы режимы установления потока в канале. Обнаружены четыре типа переходных процессов, соответствующих различным уровням интенсивности теплообмена.

При боковом подогреве квадратной полости, заполненной жидкостью с заданной начальной линейной стратификацией, увеличение перепада температур, приложенного к вертикальным границам области, приводит к последовательному переходу от слоистого течения к течению с наклонными вихрями. При дальнейшем росте перепада температур образуется треугольная структура вихрей и далее уже возникает глобальное одновихревое течение, характерное для свободной конвекции однокомпонентной жидкости при подогреве сбоку. Установлено, что при слоистом режиме конвекции при увеличении вертикального масштаба области происходит рост количества горизонтальных вихрей. Показано также, что вихревые структуры при слоистом режиме конвекции имеют квазидвумерный характер.

Проведены обобщение и численный анализ модели для определения поля вокруг одиночной звуконепроницаемой сферы с различным значением комплексного сопротивления при прохождении двух видов волн: плоской и сферической от монополюсного источника излучения. В литературе рассмотрены в основном только два предельных случая — акустически жесткая и мягкая сферы, в настоящей работе при постановке граничных условий был рассмотрен общий случай, позволяющий использовать сферу с произвольным комплексным сопротивлением. Данная модель в дальнейшем позволит провести обобщения на случаи акустического рассеяния от звукопроницаемой сферы и рассеяния от множества сфер.

Завершен этап исследований, связанный с подготовкой массовых вычислительных экспериментов на вихревых трубах различной геометрии. Основное внимание уделено построению конечно-разностных сеток, соблюдающих условие гексагональности и ортогонализованности и позволяющих снизить погрешность при одновременном уменьшении количества узловых точек. При тестировании сеток разных конфигураций получен ряд результатов как повторяющихся характерную для вихревой трубы температурную стратификацию (эффект Ранка–Хилша), так и с обратным распределением температуры. Так как инверсия температуры наблюдалась при одновременном изменении характеристик разностной сетки и определяемых указанными характеристиками параметров завихрителя, вывод о том, определяется ли аномальная температурная инверсия вычислительными особенностями или является физической характеристикой системы, может быть сделан по результатам дальнейших исследований.

Температурная стратификация дисперсных систем. Рассмотрено влияние длины основного канала вихревой трубы на величину производства холодного и горячего воздуха. Разработана модель и проведены предварительные расчеты вихревой трубы с дополнительным каналом подачи воздуха, расположенным на одной оси с основным каналом со стороны горячей диафрагмы. Установлено, что зависимость расхода воздуха через холодную диафрагму от длины основного канала имеет нелинейный характер. Определена также зависимость эффекта температурной стратификации от граничных условий (Михайленко К.И.).

Численное исследование закономерностей конвективных течений Рэлея–Бенара полимерных жидкостей. Установлено, что при свободном конвективном течении жидкости с аномальной зависимости вязкости от температуры решающую роль при формировании потоков играет эволюция вязкого барьера и, в зависимости от параметра, характеризующегося зависимостью вязкости от температуры, образуется или один из вариантов вихревого течения, или структура течения, соответствующая режиму чистой теплопроводности. Установлено, что наличие вязкого барьера приводит к появлению вихрей различного масштаба и, вследствие этого, к многомасштабности течения (Моисеев К.В.).

Нелинейная динамика пузырьковых кластеров в акустических полях с учетом диффузионных процессов и влияния различных сил на систему пузырьков. При исследовании рассеяния волн в акустическом диапазоне от пары твердых частиц и от нескольких капель/пузырьков сферической формы с центрами, расположенными на одной оси, проведены обобщение и численный анализ модели для определения поля вокруг/внутри сфер при прохождении акустической волны от монополюсного источника излучения, произвольно расположенного в пространстве. Исследованы различные подходы по усечению бесконечных рядов в разложении. Полученные результаты позволят в дальнейшем провести тестовые расчеты для верификации общего численного алгоритма для случая множества произвольно расположенных в пространстве сфер (Насибуллаева Э.Ш.).

Особенности гидродинамической устойчивости жидкостей в каналах теплообменников. При определении потери устойчивости течения жидкостей в каналах теплообменных устройств необходимо учитывать зависимость вязкости от температуры. Установлено влияние экспоненциальной зависимости вязкости от температуры на критические параметры гидродинамической устойчиво-

сти несжимаемой жидкости при линейном изменении температуры по сечению плоского канала. При достаточно больших числах Пекле построены спектры собственных значений для обобщенного уравнения Орра–Зоммерфельда. Показано, что кривые нейтральной устойчивости и критическое число Рейнольдса в значительной степени зависят от свойств жидкости, определяемых показателем экспоненциальной функции вязкости (Низамова А.Д., Урманчиев С.Ф.).

Определение коэффициента гидравлического сопротивления при течении термовязкой жидкости в каналах переменного сечения. При течении жидкостей с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры установлено влияние локального нагрева на характер изменения коэффициента гидравлического сопротивления. Показано, что с увеличением параметра термовязкости коэффициент гидравлического сопротивления значительно уменьшается. Стоит отметить, что эффект наиболее выражен при изменении отношения длины локального нагрева ко всей длине канала в диапазоне $0 < \lambda < 0.6$. При больших значениях λ коэффициент гидравлического сопротивления изменяется незначительно. Таким образом, в соответствии с расчетными данными по оптимизации затрат электроэнергии на локальный нагрев возможно повысить эффективность различных технологических процессов (Урманчиев С.Ф., Низамова А.Д.).

Динамика волн и вихреобразование при взаимодействии воздушного сферического импульса давления с защитным барьером из водной пены. Показано, что увеличение объемного водосодержания в пенном слое при его уплотнении под воздействием ударного импульса приводит к снижению скорости фронта УВ и блокирует ее прохождение вглубь пены. Установлено, что основной причиной формирования тороидальных вихревых зон и турбулизации потока в газовой области за фронтом УВ является искривление линий тока за счет развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, возникающей в результате изгиба границы газ–пена при ее взаимодействии со сферической УВ. Подтверждена достоверность полученных решений сравнением с решениями аналогичной задачи другими численными методами и экспериментальными данными (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.).

Особенности формирования вскипающей струи водяного пара, истекающей из сосуда высокого давления через тонкое сопло. Установлено, что взаимодействие высокоскоростного потока с примыкающей к нему невозмущенной зоной приводит к искривлению траектории движения газа и развитию неустойчивости Кельвина–Гельмгольца,

что сопровождается образованием и развитием вихревых зон. Формирование серии тороидальных вихрей вблизи оси симметрии в окружающей струе газе приводит к появлению осциллирующей формы основного струйного течения с сохранением полости внутри струи. С течением времени струйный поток в процессе взаимодействия с газовой областью формирует в ней последовательную серию акустических волновых импульсов, являющихся источником пульсаций, фиксируемых в экспериментах (Болотнова Р.Х.).

Исследование гармонических волн в жидкости с паровоздушными пузырьками миллиметрового размера показало, что при изменении равновесной температуры от комнатной до точки кипения коэффициент затухания меняется в десятки и сотни раз в зависимости от частоты возмущений. В случае мелкодисперсных смесей из-за большего влияния капиллярных сил на межфазной поверхности изменение фазовой скорости и коэффициента затухания гораздо слабее (не более двух раз) (Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Агишева У.О.).

На основании модельных расчетов показано, что при падении акустической волны со стороны пузырьковой жидкости на границу раздела с «чистой» жидкостью для низкочастотных волн ($\omega < \omega_R$) существует критический угол падения, при углах больших которого волна полностью отражается от границы раздела (Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Агишева У.О.).

Теоретически показано, что увеличение степени перегрева жидкости приводит к сужению области устойчивости пузырьковой системы из-за роста массовой доли пара в пузырьках (Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н., Агишева У.О.).

При локальном охлаждении области скачкообразного сужения канала в плоском случае за счет влияния зависимости вязкости жидкости от температуры происходит увеличение гидравлического сопротивления. Ранее аналогичный результат получен и в случае подогрева, но, естественно, с противоположным эффектом. Следует отметить, что степень увеличения коэффициента гидравлического сопротивления при охлаждении оказалась выше, чем степень его снижения при подогреве, что связано с нелинейностью зависимости вязкости от температуры (Урманчиев С.Ф., Низамова А.Д.).

Установлена причина увеличения трения при продольном относительном перемещении цилиндров вследствие вращения внутреннего цилиндра: течение Куэтта приводит к образованию динамических конвективных структур в зазоре между двумя коаксиальными трубами, деформация которых и приводит к появлению эффекта. Результат реше-

ния задачи позволит установить причину дополнительного сопротивления, например, при расширении скважины для дальнейшего протаскивания трубопровода. Проведена оптимизация величины балластировки трубопровода при подготовке его к протаскиванию с учетом реологических свойств бурового раствора и фильтрационных свойств грунта. Определены допустимые величины препятствий в скважине подводного перехода, при которых возможно их преодоление в процессе протаскивания (Урманчиев С.Ф.).

Разработана математическая модель течения базальтовой магмы в системе грунтовых трещин, содержащих субвулканическую камеру. Базальтовая магма представлена как термовязкая жидкость с двухзвенной экспериментальной зависимостью вязкости от температуры. Задача теплового взаимодействия магмы с вмещающими породами описана условиями теплообмена на стенках каналов и субвулканической камеры. При этом вмещающие породы подчиняются уравнению теплопроводности. Установлено, что при протекании магмы в трещине в условиях значительных градиентов температуры вблизи одной из стенок возникает зона разогрева магмы, обусловленного вязкой диссипацией (Моисеев К.В.).

Для исследования температурной стратификации потока газа в вихревой трубе построена математическая модель с учетом особенностей конфигурации входного и выходного устройств. Проведен анализ сеток различной конфигурации для реализации численной модели. При этом сетка должна быть гексагональной — для сокращения общего количества граней конечных объемов и для сокращения объема вычислений; по возможности ортогонализированной и равномерной — для уменьшения вычислительной погрешности. Показано, что построенные сетки удовлетворяют поставленным условиям (Михайленко К.И.).

Исследовано распространение ударной волны (УВ) в слое водной пены для условий новых экспериментальных данных с визуализацией динамики водосодержания пены под воздействием УВ (Monloubou M., Le Clanche J., Kerampran S. Actes, 2019). Разработанная математическая модель описывает поведение пены как неньютоновской жидкости с учетом эффективной вязкости Гершеля–Балкли, межфазных теплообменных процессов по модели Ранца–Маршалла и реалистических уравнений состояния, описывающих термодинамические свойства компонент водной пены. Модель численно реализована в разработанном авторами решателе пакета OpenFOAM. Показано, что изменение структуры водной пены за фронтом УВ

приводит к формированию в пенном слое локальной зоны с высоким объемным водосодержанием, способствующей ослаблению УВ. Получено удовлетворительное согласование численных расчетов с экспериментальными данными (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.).

Проведен сравнительный анализ аналитического автомоделного и численного решений с применением пакета OpenFOAM для задачи Седова о точечном взрыве в газе для оценки достоверности численных исследований по динамике УВ с применением решателя пакета OpenFOAM (Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А.).

Исследованы собственные колебания столба жидкости в вертикальной нефтяной скважине, возникающие при резком закрытии или открытии скважины (гидроударе). При этом период колебаний, интенсивность затухания колебаний определяются не только протяженностью столба жидкости в скважине, ее диаметром и реологическими свойствами жидкости, но и коллекторскими характеристиками призабойной зоны пласта (в частности, коэффициентами проницаемости, качеством перфорации скважин и свойствами образованных трещин ГРП). С использованием математической модели, описывающей движение столба жидкости в скважине и фильтрацию в призабойной зоне, найдены решения задачи о собственных затухающих колебаниях столба жидкости в скважине. Получены характеристические уравнения для определения комплексных частот (частоты колебаний и коэффициента затухания). Изучены зависимости колебаний наилучшей частоты собственных колебаний, коэффициента затухания и декремента затухания от проницаемости пласта. Установлено, что с увеличением коэффициента проницаемости пласта в диапазоне от 10^{-15} м^2 до 10^{-10} м^2 частота собственных колебаний монотонно снижается, таким образом, период колебаний при изменении коэффициента проницаемости от самых низких значений увеличится приблизительно в два раза. Наиболее нетривиальным эффектом является нелинейная зависимость коэффициента затухания и декремента затухания от проницаемости пласта. Показано, что по собственным колебаниям жидкости внутри скважины можно судить о качестве открытого участка скважины, геометрических характеристиках скважины, коллекторских свойствах призабойной зоны, сопоставляя наблюдаемые параметры изменения давления в различных точках скважины (основные частоты, коэффициент затухания, сдвиг по фазе, амплитуды) с расчетными значениями, получаемыми по рассматриваемой модели (Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З.).

На основе анализа решений типа гармонических волн в трещинах, находящихся в низкопроницаемых пластах и расположенных перпендикулярно скважине, показано, что трещины для низкочастотных колебаний давления в скважине являются своеобразным волновым каналом. Иначе, характерное расстояние затухания волн в трещинах, а также в пласте вблизи нее может быть значительно выше, чем в однородной пористой среде при отсутствии трещины (Шагапов В.Ш.).

Исследован процесс формирования полой струи при истечении из тонкого сопла водяного пара, изначально находящегося при высоком давлении в сверхкритическом состоянии. Численное моделирование проведено с применением решателя sonicFoam библиотеки открытого пакета OpenFOAM в двумерной осесимметричной постановке. Показано, что процесс истечения сопровождается формированием полой струи в условиях сверхзвукового режима при отсутствии конденсации, что способствует образованию внутренней границы струи (диска Маха) и развитию внешнего и внутреннего тороидальных вихрей, поддерживающих режим сохранения полости в центре струи (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.).

Проведено численное исследование процесса взаимодействия сферического ударного импульса в газовой области с защитным барьером из водной пены. Поставленная задача решена для случая двумерной осевой симметрии с использованием двухфазной газожидкостной модели, базирующейся на законах сохранения массы, импульса и энергии смеси и уравнении динамики объемного содержания фаз с применением решателя compressible-MultiphaseInterFoam открытого пакета OpenFOAM, модифицированного в соответствии с условиями задачи и модельными представлениями. Показано, что сжатие водной пены под действием УВ приводит к существенному снижению скорости фронта УВ и блокировке ее прохождения в пенный слой, что сопровождается искривлением границы между газом и пеной и формированием тороидальных вихрей в газовой области (Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.).

Исследована динамика импульсного сигнала, распространяющегося в подземном трубопроводе с поврежденным участком. Рассмотрены волны давления, распространяющиеся по линейному трубопроводу, заполненному флюидом, а диссипация из-за вязкого трения и теплопроводности учитывается в тонком слое жидкости или газа вблизи стенки. Участок трубопровода с повреждением принят за отражающую поверхность. При получении условий на этой поверхности принято, что ин-

тенсивность утечки жидкости при прохождении волны через поврежденный участок полностью лимитируется проницаемостью грунта. Из анализа дисперсионных выражений для коэффициентов отражения и прохождения, а также результатов расчетов методом быстрого преобразования Фурье для эволюции импульсного сигнала при прохождении через поврежденный участок показано, что в низкопроницаемых грунтах сигнал слабо «чувствует» повреждения, а в высокопроницаемых — «чувствителен» только для коротких (высокочастотных) импульсных сигналов (Шагапов В.Ш.).

Изучено распространение слабых возмущений в водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо нерастворимого в воде газа (например, воздуха) присутствуют пары воды, которые в процессе движения смеси могут переходить в состав воды. Находящийся в пузырьках воздух, также будет оказывать диффузионное сопротивление на интенсивность фазовых переходов системы «пар–вода». Проанализировано влияние начальных параметров двухфазной смеси «вода–пузырьки» (объемное содержание фаз, размеры дисперсной фазы, а также температура воды) на эволюцию гармонических волн в пузырьковой жидкости (Шагапов В.Ш., Галимзянов М.Н.).

Исследования направлены на решение фундаментальных задач гидродинамики, тепло- и массообмена, связанные с установлением новых закономерностей и гидродинамических эффектов в многофазных и термовязких системах. Практическая мотивация исследований основана на необходимости разработки эффективных расчетных методов для современных технологий и создания математических моделей прогнозирования поведения гидродинамических систем в условиях воздействия внешних физических полей (Урманчиев С.Ф., Низамова А.Д., Киреев В.Н.).

При течении жидкостей с различными видами зависимости вязкости от температуры была рассмотрена задача о влиянии теплообмена на гидравлическое сопротивление канала с переменным сечением. В результате проведенных численных экспериментов были предложены поправки к формулам Вейсбаха по определению гидравлического сопротивления каналов со скачкообразным изменением сечения (Урманчиев С.Ф., Низамова А.Д., Киреев В.Н.).

Установлено, что учет эффекта зависимости вязкости от температуры существенным образом сказывается и на величине критического числа Рейнольдса при анализе гидродинамической устойчивости течения термовязких жидкостей в каналах теплообменников. При этом можно сделать вывод,

что критическое число Рейнольдса зависит от энергии активации, характеризующей зависимость вязкости от температуры: увеличение экспоненциального параметра приводит к уменьшению области ламинарного течения жидкости (Урманчиев С.Ф., Низамова А.Д., Киреев В.Н.).

Установлено влияние «вязкого барьера» и выявлена роль формирования третичных вихрей на глобальную картину течения. Обнаружен новый вид структуры конвективных течений в задаче о тепловой конвекции аномально термовязкой жидкости. При определенных значениях числа Рэлея наличие функциональной зависимости вязкости от температуры гауссовского типа приводит к режиму течения с изолированными конвективными ячейками. В этом случае формируется течение, в котором конвективные валы отделены друг от друга вязким барьером (Моисеев К.В., Кулешов В.С.).

Выявлен ряд особенностей эволюции конвективных валов при боковом подогреве непрерывно стратифицированной жидкости в зависимости от безразмерных управляющих параметров задачи: при увеличении перепада температур происходит последовательный переход от слоистого течения к течению с наклонными вихрями, затем к течению, имеющему треугольную структуру вихрей, и далее к глобальному одновихревому течению, характерному для свободной конвекции однокомпонентной жидкости при подогреве сбоку. Также показано, что при слоистом режиме конвекции при увеличении вертикального масштаба области происходит увеличение количества горизонтальных вихрей (Моисеев К.В., Кулешов В.С.).

Представлены результаты исследования по отражению волн в акустическом диапазоне от капель сферической формы. Решение этой задачи имеет принципиальное значение для диагностики паров и газок капельных потоков в камерах сгорания ракетных и авиационных двигателей, аппаратах химических технологий и других устройствах. Благодаря построенной обобщенной модели отражения волн от сферы был рассмотрен общий случай, позволяющий рассмотреть звукопроницаемую сферу (т.е. сферу, сквозь границу которой проходит акустическая волна), что позволило адекватно описать экспериментальные данные. Проведены исследования отражения волн от пары как звуконепрозраемых, так и звукопроницаемых сфер и вычислены соответствующие коэффициенты. Параметрический анализ для одиночной сферы и для пары сфер показал, что при определенных значениях параметров могут создаваться условия, при которых за сферой или парой сфер появляется либо зона пониженного давления (пятно Пуассона), либо зо-

на повышенного давления (сфера является жидкой линзой). Таким образом, разработанная модель отражает экспериментально наблюдаемые эффекты (Насибуллаева Э.Ш.).

На основе разработанной компьютерной программы проведены вычислительные эксперименты по тепловой стратификации в трубе Ранка–Хиллша. Установлено, что, когда воздух в вихревую трубу подается при постоянном объемном расходе, образующийся выход холодного воздуха оказывается значительно ниже, чем в случае постоянного давления на входе. Существенное влияние на эффект стратификации оказывает размер площади кольца горячего выхода вихревой трубы. Независимо от геометрии холодного выхода основное охлаждение выходящего воздуха происходит непосредственно в сопле холодного выхода, тогда как на переходе из трубы в сопло воздух имеет приблизительно одинаковую температуру, лишь немногим меньшую в сравнении с температурой подаваемого газа (Михайленко К.И.).

**Лаборатория «Механика твердого тела»
Заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.,
член-корреспондент РАН М.А. Ильгамов**

Решена задача о взаимном влиянии выпучивания упругой пластины под действием сжимающей силы и отклонения контактной границы жидкостей с разными плотностями. Полученное решение позволяет определить обобщенный критерий (критическую силу) при взаимодействии неустойчивости Эйлера и неустойчивости Рэлея–Тэйлора (М.А. Ильгамов).

Определяется поперечная распределенная нагрузка на пластину, находящуюся в газовой среде. Разные значения давления газов на обе поверхности образуют как перепад давления, так и поперечную силу, зависящую от кривизны срединной по-



Рис. 3. Член-корреспондент Российской академии наук Марат Аксанович Ильгамов

верхности. Показано, что в общем случае обе эти составляющие поперечной силы должны учитываться. При малом отношении среднего давления к модулю упругости материала и при большой относительной толщине влияние второй составляющей нагрузки мало. При малой относительной толщине пластины, большом отношении среднего давления среды к модулю упругости материала влияние второй составляющей поперечной нагрузки на изгиб становится значительным.

Статический и динамический изгибы трубопровода в вертикальной плоскости под действием собственного веса рассматриваются с учетом взаимодействия внутреннего давления и кривизны осевой линии, а также осесимметричной деформации. Давление состоит из постоянной и переменной по времени частей и предполагается равномерно распределенным по всему пролету между опорами. Дается анализ реакции трубопровода на ступенчатое возрастание давления, когда может быть найдено точное решение задачи. Вводится в рассмотрение начальная стадия изгиба, определяемая малостью упругих сил по сравнению с инерционными. На этой стадии решение находится в степенных рядах, при этом закон изменения давления может быть произвольным. Это решение дает начальные условия для определения дальнейшего процесса. Приводится сравнение продолжительности инерционной стадии со временами резкого изменения давления и ударных волн в жидкостях и газах. Определяются конструкционные параметры, когда ударное давление воспринимается только инерционными силами в трубопроводе.

Вращательные колебания трубопровода в большей степени влияют на его изгибные колебания, чем последние на вращательные. Анализ показывает, что динамическое поведение рассмотренной системы отличается большим разнообразием в зависимости от входных параметров. Ввиду большого числа последних не удастся определить разные режимы движения трубопровода через небольшое число безразмерных параметров. Поэтому для заданного набора входных параметров по использованной модели трубопровода необходимо проводить отдельный анализ.

Изучаются изгибные колебания трубопровода, провисающего над грунтовыми берегами или оврагами. Учитывается влияние внутреннего давления в трубе на эти колебания. Статический изгиб определяется в зависимости от веса трубы и транспортируемой среды. Скорость движения жидкости не учитывается. Предполагается, что части трубопровода по обе стороны от провисающего участка заделаны в грунт с одинаковыми свойствами.

ми. Влияние грунта моделируется распределенной системой пружин с определенными жесткостями в продольном и поперечном направлениях трубопровода. Определяется спектр частот в зависимости от давления жидкости, массы присоединенного грунта, жесткости грунта. Рассматриваемая расчетная схема справедлива не только в случае трубопровода и грунта, но и в случае конструкций трубопроводемкости, где более податливая сплошная среда уменьшает концентрацию напряжений в месте соединения трубопровода со стенкой емкости. Показано, что с увеличением жесткости грунта растет и частота колебаний трубопровода, причем тем быстрее, чем меньше присоединенная масса грунта. Получено, что собственные частоты колебаний центральной части трубопровода не зависят от относительной жесткости и присоединенной массы грунта.

Рассмотрен статический изгиб тонкой упругой пластины, разделяющей две жидкости с разными плотностями и скоростями движения. Жидкости предполагаются несжимаемыми, а срединная поверхность пластины — недеформируемой. Изучено статическое взаимодействие неустойчивостей Эйлера, Гельмгольца и Релея в зависимости от сжимающей пластину силы, скоростей движения жидкостей, а также ускорения, направленного перпендикулярно к контактной границе. Найдены области изменения этих параметров, когда происходят стабилизация и дестабилизация плоской формы пластины и контактных поверхностей. Установлены динамические режимы деформации пластины при резком повышении и падении давления. Разработан метод решения задачи в случае сложной формы изменения давления.

Пространственные колебания трубопровода и транспортируемой жидкости при действии внутреннего переменного и ударного давлений исследованы на основе модели изгибно-вращательных движений. Модель учитывает как взаимодействие внутреннего давления и изменения кривизны осевой линии трубы, так и взаимное влияние ее окружной и продольной деформаций. Установлено, что как при гармоническом изменении динамической части внутреннего давления, так и после кратковременного действия ударной нагрузки изгибные и вращательные колебательные движения стального трубопровода, могут иметь сложный характер. Исследование позволяет оценить напряженно-деформированное состояние трубопровода и разработать меры по его защите от повреждений и разрушения.

Собственные частоты изгибных колебаний трубопровода в грунте определены по модели Кирх-

гоффа. Показано, что по двум известным низшим частотам можно определить жесткость и присоединенную массу грунта, а по одной известной частоте — давление жидкости внутри трубопровода. Установлено, что пять собственных частот — минимальное число, по которым можно восстановить характер закрепления на обоих концах трубопровода.

Доказана теорема о единственности решения обратной задачи об идентификации дифференциального уравнения и двух краевых условий, описывающих изгибные колебания стержня переменной жесткостью с упруго закрепленными концами. Такие системы используются для вибрационной защиты от ударных воздействий.

Исследованы продольные и изгибные колебания стержней с дефектами. Показано, что координата, длина и площадь поперечного сечения стержня в зоне повреждения могут быть определены по трем собственным частотам продольных колебаний. Установлено, что по известным низшей частоте изгибных колебаний, координате, длине и площади поперечного сечения в зоне дефекта определяется осевой момент инерции стержня.

Получены новые результаты в задаче о колебаниях струны в неоднородной внешней среде, коэффициент упругости которой описывается полиномиальным потенциалом. Показано, что краевые условия могут быть идентифицированы однозначно по трем собственным частотам колебаний.

Рассмотрена задача вдавливания цилиндрической оболочки в упругопластическое полупространство, имеющее цилиндрическую вогнутость. Проведены расчет и анализ напряженно-деформированного состояния стальной оболочки и упругопластического полупространства.

Изгибная жесткость трубопровода, растягивающие силы, внешнее гидростатическое давление стабилизируют или начальная форма трубопровода является устойчивой, а сжимающие силы, внутреннее гидростатическое давление, движение жидкости с любыми скоростями внутри трубопровода дестабилизируют его или начальная форма трубопровода является неустойчивой.

Рассмотрены статический изгиб и продольная устойчивость нанопроволок, находящихся под давлением жидкости или газа. Учитываются два поверхностных эффекта. Первый обусловлен различием упругих свойств в тонком приповерхностном слое и в основном объеме материала. Эффективные жесткости на растяжение и изгиб могут быть больше или меньше чем обычные жесткости в зависимости от материала. Второй эффект обусловлен взаимодействием избыточного давления на

круговую боковую поверхность проволоки и разности площадей выпуклой и вогнутой сторон поверхности, появляющейся при изгибе. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше отношение давления к модулю упругости материала и длины проволоки к ее диаметру (Ильгамов М.А.).

Статический цилиндрический изгиб нанопленок рассмотрен в линейной и нелинейной постановках. Определены спектр частот изгибных колебаний и параметрический резонанс. При этом учитываются два поверхностных эффекта. Первый из них связан с различающимися упругими свойствами в приповерхностном слое и в основном объеме материала и проявляющийся при растяжении и изгибе пленок нанометровых толщин. Второй эффект обусловлен появляющейся при изгибе разностью площадей выпуклой и вогнутой поверхностей, на которые действуют давления газов. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше отношение среднего давления к модулю упругости материала и длины пленки к ее толщине. Имеют значение условия нагружения торцевых поверхностей пленки, а также деформация по толщине пленки под действием среднего давления. Положительное среднее избыточное давление (сжатие) приводит к увеличению эффективной жесткости, уменьшению прогиба, возрастанию собственных частот. Отрицательное среднее давление (вакуумирование) уменьшает жесткость и собственные частоты. Показано, что в этом случае может иметь место изгиб пленки в результате потери продольной устойчивости. Колебания среднего давления приводят к параметрическому усилению изгибных колебаний. Эти результаты не могут быть получены на основе классических уравнений изгиба тонких пластин и пленок (Ильгамов М.А.).

Исследованы пространственные колебания участка трубопровода, находящегося по концам на опорах. Труба, изогнутая собственным весом и постоянным давлением заключенной в ней жидкости, подвергается гидравлическому удару. Для приближенного анализа динамики деформирования трубопровода вводятся в рассмотрение инерционная и инерционно-упругая стадии по времени. На первой стадии учитываются только давление в жидкости и инерционные силы. В конце первой стадии действие ударной нагрузки прекращается. Вторая стадия изгибно-вращательных движений трубопровода является продолжением ее инерционной стадии. Задача Коши с нулевыми начальными условиями решается также численным методом Рунге–Кутты. Результаты вычислений, полученные для стальной трубы с транспортируемой жидкостью, позволили сделать следующие крат-

кие выводы. На начальной стадии реакции трубопровода на ударное давление в транспортируемой жидкости можно учитывать только инерционные силы и пользоваться линеаризованными уравнениями движения. В конце времени удара, являющегося началом инерционно-упругой стадии деформирования, изгибные перемещения трубы без заметной погрешности могут быть приняты равными нулю. Скорости изгибных перемещений трубы за время удара достигают конечных значений, они прямо пропорциональны амплитуде динамической составляющей внутреннего давления. При этом угловая скорость вращательного движения трубопровода может быть принята равной нулю. С ростом амплитуды динамической составляющей внутреннего давления на инерционно-упругой стадии растут также амплитуды изгибных перемещений трубопровода. При этом модули минимумов угла поворота трубы всегда больше ее начального угла отклонения. В рамках принятых в работе допущений для описания пространственных колебаний трубопровода можно использовать приближенную систему нелинейных уравнений. На инерционно-упругой стадии колебаний положение трубы в пространстве с допустимой погрешностью может быть определено также аналитическим решением, полученным методом последовательных приближений. Для принятых входных данных приближенное аналитическое и численное решения находятся в удовлетворительном согласии (Шакирьянов М.М.).

Линейная устойчивость упругой цилиндрической оболочки, содержащей несжимаемую идеальную жидкость, при ударе по торцу в осевом направлении рассмотрена в предположении о мгновенном установлении сжатия по всей длине. Основное внимание уделяется анализу волнообразования в условиях контактного взаимодействия с жидкостью. Приводятся также результаты экспериментального исследования волнообразования в оболочке с жидкостью и без жидкости. Дается сравнение их с теоретическими данными. Показано уменьшение размеров волн по окружности и длине оболочки, содержащей жидкость, по сравнению с пустой оболочкой (Ильгамов М.А.).

Рассмотрены сопротивления сплошных сред при ускоренном движении трубопровода. Недеформируемый трубопровод бесконечной длины, окруженный идеальной несжимаемой жидкостью, движется с ускорением перпендикулярно своей оси. Трубопровод имеет круговое поперечное сечение. Транспортируемая газожидкостная среда в трубе включает в себя граничащие области с двумя фазами: жидкой и газовой. Предполагается, что течение газа в осевом направлении происходит внут-

ри жидкой круговой цилиндрической области. Влиянием сил гравитации на поперечные движения частиц сред пренебрегается. Возмущенные движения внутренних газовой, жидкой и внешней сплошной сред, вызванные ускорением трубопровода, описываются уравнениями Лапласа в полярных координатах относительно потенциалов скоростей. Показано, что отношение присоединенных масс жидкости с учетом и без учета перетекания частиц газожидкостной смеси в поперечных сечениях является функцией геометрических размеров трубы и плотностей сред. Исследованы изгибные колебания двухопорного трубопровода под действием внутреннего переменного давления. Транспортируемая среда в трубопроводе состоит из жидкой и газовой фаз. Предполагается, что течение газа в осевом направлении происходит внутри жидкой круговой цилиндрической области; при этом скоростью течения пренебрегается. Учитываются изменения давления в жидкости, обусловленные ускоренным движением трубопровода. Получены численное и приближенное аналитическое решение уравнения установившихся изгибных колебаний (Шакирьянов М.М., Юлмухаметов А.А.).

Представлены результаты моделирования струйного безотрывного обтекания упругой цилиндрической оболочки с нелинейными граничными условиями. Учитывается действие среднего давления на оболочку. Решение получено в виде рядов по степеням параметра аэрогидроупругости. Приводятся формы поперечного сечения оболочки, распределение давлений на деформированной и недеформированной оболочках, распределение безразмерного изгибающего момента, перерезывающей силы, усилия натяжения (Хакимов А.Г.).

В статической и динамической постановках рассмотрен линейный изгиб консольного стержня, нагруженного всесторонним давлением и продольной силой. В отличие от случая двухопорного стержня положительное избыточное давление на поверхности консольного стержня уменьшает критическое значение сжимающей силы неизменного направления, а отрицательное избыточное давление (вакуумирование) — увеличивает его. Действие избыточного давления на поверхность консольного стержня не вносит изменений в известный результат об отсутствии равновесного отклоненного положения под действием сжимающей следящей силы. Происходит стабилизация динамического поведения при действии положительного избыточного давления и дестабилизация при вакуумировании. При одновременном действии сжимающей силы неизменного направления и сжима-

ющей следящей силы происходит уменьшение критического значения первой из них. В случае растягивающей следящей силы это значение увеличивается, что объясняется изменением направления их равнодействующей. Действие окружающего избыточного давления приводит к большему разнообразию упругого поведения стержня (Ильгамов М.А.).

Явление изгибания вверх пролета трубопровода между вибрирующими опорами может быть объяснено тем же механизмом, который приводит к подобному эффекту в случае маятника Капицы. В данном случае картина осложняется изменением общего прогиба, играющего роль длины маятника, в зависимости от игры сил гравитации и внутреннего давления, угла качения пролета вокруг оси, проходящей через опоры. При вертикальных колебаниях опор рассмотрен случай преобладающего влияния на изгиб внутреннего давления. При высоких частотах и малых амплитудах колебаний опор общий прогиб в принятом приближении может быть определен из нелинейного уравнения статического изгиба. Условие равенства момента распределенных по длине трубопровода сил гравитации и момента сил вибрации опор определяет границу областей выпучивания к нижнему и верхнему положениям. Предельные значения областей притяжения получаются при малой гравитации и сильной вибрации опор (Ильгамов М.А., Шакирьянов М.М.).

Влияние избыточного давления окружающей среды на спектр частот колебаний стержня определяется безразмерным параметром. Он возрастает при увеличении давления и длины стержня, уменьшается с ростом изгибной жесткости. При вакуумировании безразмерный параметр меняет знак, частоты уменьшаются. С увеличением как распределенной, так и точечной присоединенной массы собственные частоты колебаний уменьшаются ввиду неизменной изгибной жесткости стержня. Перемещение точечной массы к центру приводит к уменьшению нечетных собственных частот, в то время как четные частоты не меняются. По измеренной первой частоте может быть определено избыточное давление, действующее на поверхность стержня (за исключением торцевых поверхностей). По измеренным двум частотам изгибных колебаний определяется точечная присоединенная масса и ее координата. Эти результаты могут быть использованы при моделировании работы резонаторов, в том числе микро и нанорезонаторов (Ильгамов М.А., Хакимов А.Г.).

Большая удельная поверхность микро- и нанорезонаторов обуславливает заметное проявление различных поверхностных эффектов. Изгибная мо-

дель упругой полоски, закрепленной шарнирно по концам, позволяет наиболее просто определить влияние избыточного давления окружающей среды на ее колебания, что до сих пор не учитывалось. Это влияние на спектр частот определяется безразмерным параметром. Он пропорционален отношению давления к модулю упругости материала и квадрату отношения длины резонатора к его толщине. С увеличением избыточного давления окружающей среды частоты колебаний возрастают. При вакуумировании частоты снижаются. Для реальных входных параметров эти изменения являются существенными, особенно для низших гармоник. При высоких давлениях окружающей среды и большом отношении длины к толщине резонатора спектр частот мало зависит от модуля упругости и толщины. Определяющим является только длина и отношение давления к плотности материала. Эти результаты не могут быть получены в рамках обычной теории резонаторов. Ввиду большой разницы результатов представляется целесообразным соответствующее экспериментальное исследование. По первой частоте изгибных колебаний можно определить давление окружающей среды. С увеличением равномерно распределенной присоединенной массы и уменьшением избыточного давления собственные частоты колебаний уменьшаются. С увеличением присоединенной массы в середине резонатора нечетные частоты изгибных колебаний уменьшаются. Четные собственные частоты изгибных колебаний резонатора не зависят от точечной массы, находящейся в середине. По двум частотам изгибных колебаний можно определить точечную присоединенную массу и ее координату по длине резонатора (Ильгамов М.А., Хакимов А.Г.).

Сопоставлены результаты молекулярно-динамического расчета частот собственных изгибных колебаний УНТ различного диаметра с предсказанием теории тонких упругих оболочек. Установлено, что для УНТ радиуса, большего $13,68^\circ \text{A}$, размерный эффект перестает проявляться и теория оболочек может использоваться с высокой точностью для оценки частот изгибных колебаний. Об этом также свидетельствует малость погрешности в оценке частот старших гармоник УНТ при радиусе, большем $13,68^\circ \text{A}$. Полученные результаты для УНТ достаточно большого радиуса хорошо согласуются с литературными данными. С уменьшением радиуса УНТ точность континуальной теории снижается. Аппроксимирующие выражения могут использоваться для расчета частот колебаний УНТ малого радиуса. С ростом амплитуды колебаний за счет геометрической и физической нелинейностей

УНТ наблюдается снижение частоты собственных изгибных колебаний. Результаты исследования полезны для создания терагерцовых резонаторов и наносенсоров малых масс и сил, основанных на использовании резонансных частот колебаний УНТ, проявляющих эффект электромеханической связи (Дмитриев С.В., Сунагатова И.Р., Ильгамов М.А., Павлов И.С.).

Динамические свойства углеродной нанотрубки могут быть определены с удовлетворительной точностью с использованием ее эффективных жесткостных и массовых характеристик и уравнений теории тонкостенных оболочек. В настоящей работе таким образом рассмотрено поведение однослойной нанотрубки под действием динамического давления на ее внешнюю поверхность. Давление принимается равномерным по всей поверхности в виде ступеньки по времени. Далее оно остается постоянным. При этом давление излучения можно не учитывать в случае легких газов. В условиях плоской деформации трубки может быть рассмотрено кольцо прямоугольного поперечного сечения. Малое начальное отклонение от круговой формы задается в виде суммы гармоник с убывающими амплитудами. Важными параметрами в анализе являются статическое критическое значение давления и собственные частоты радиальных колебаний. Они зависят от количества атомов, образующих кольцо, и его эффективных характеристик. Если действующее давление меньше статического критического давления, то возбуждаются колебания кольца. В противном случае прогибы в линейном анализе неограниченно возрастают. Они сопровождаются высокочастотными колебаниями с уменьшающимися амплитудами по росту гармоник. Определяется преобладающая гармоника в различные моменты динамического выпучивания в зависимости от количества атомов, образующих кольцо. В начале процесса преобладает низшая гармоника с наибольшей амплитудой в начальном прогибе, в дальнейшем быстрее возрастают другие гармоники и происходит их перестройка в зависимости от входных параметров. Эти результаты относятся к линейной стадии развития прогибов нанотрубки. В нелинейной стадии возможна очередная перестройка гармоник, так как потенциальная энергия деформации при более высоких гармониках растет быстрее, чем для низших гармоник. Поэтому при любом их начальном распределении и преобладающих гармониках в зависимости от отношения давления к его критическому значению основной формой деформации может являться низшая гармоника (Дмитриев С.В., Ильгамов М.А.).

Приведенная постановка задачи отличается от обычной теории свободных колебаний струн тем, что учитываются два поверхностных эффекта. Первый из них, связанный различием упругих свойств приповерхностного слоя и основного объема, приводит к изменению эффективной жесткости струны на растяжение. Второй эффект характеризуется безразмерным параметром α . В зависимости от возрастания ($\alpha > 0$) или убывания ($\alpha < 0$) избыточного давления происходит увеличение или уменьшение эффективной жесткости и частот поперечных колебаний струны по сравнению с частотами, возбуждаемыми при давлении сборки системы струна–опоры ($\alpha = 0$). Без учета второго эффекта колебания струны могут быть только периодическими и обусловленными начальными условиями. Предложен способ определения параметра α изменения давления на поверхности струны по экспериментальным данным периодов и амплитуд колебаний в различные моменты времени. Разные формулировки соответствующей обратной задачи приводят к соотношениям, позволяющим получать результаты с различной точностью (Ильгамов М.А., Утяшев И.М.).

Лаборатория «Дифференциальные уравнения механики»

Заведующий лабораторией, заслуженный деятель науки РБ, д.ф.-м.н., профессор С.. Хабиров

Получены законы сохранения в модели фильтрации газа (Хабиров С.В.).

Получены вихревые установившиеся плоские энтропийные течения идеального газа (Хабиров С.В.).

Получены законы сохранения нулевого порядка для вязкой жидкости (Хабиров С.В.).

Предложена математическая модель распространения радионуклидов с учетом их распада в земле в областях с твердыми породами, содержащих трещины (Мигранов Н.Г.).

Проведены исследования, связанные с прохождением света через ячейки с сегнетоэлектрическими жидкими кристаллами с очень малым шагом спирали при воздействии низкочастотных (1 kHz) и высокочастотных (100 kHz) электрических полей. С использованием экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, и численных расчетов удалось установить, что с увеличением частоты прикладываемого внешнего электрического поля светопропускание через ячейку уменьшалось более чем в два раза. Это важно для проектирования новых дисплеев на основе сегнетоэлектрических жидких кристаллов с временами отклика на два порядка меньше, чем ныне существующие дисплеи (Мигранов Н.Г.).



Рис. 4. Заслуженный деятель науки РБ, д.ф.-м.н., профессор Салават Валеевич Хабиров

Для одноатомной газовой динамики рассмотрены трехмерные допускаемые подалгебры, содержащие проективный оператор. С их помощью построены подмодели наименьшего ранга: инвариантные подмодели ранга один и регулярные частично инвариантные подмодели ранга два (Шаяхметова Р.Ф.).

Для всех 48 типов 4-х мерных подалгебр, допускаемых моделями сплошной среды гидродинамического типа, вычислены базисы точечных инвариантов. Это позволяет рассмотреть простейшие частично инвариантные решения ранга 1 дефекта 1. При этом получаются как регулярные, так и нерегулярные частично инвариантные подмодели (Хабиров С.В.).

Для уравнения состояния в виде давления сумма функций плотности и энтропии по двумерным подалгебрам построены инвариантные подмодели ранга 2 канонического эволюционного типа (Сираева Д.Т.).

Выведены приближенные модели раскрытия трещины в пласте под действием фильтрующей жидкости. Модели строятся на точных решениях уравнений движения вязкой жидкости, в том числе и на инвариантных решениях. Учитываются фильтрация жидкости через двигающуюся границу, отсутствие касательного движения на границе и сжимающие трещину упругие силы (Хабиров С.В., Хабиров С.С.).

Для уравнений идеальной газовой динамики в цилиндрической системе координат с произволь-

ным уравнением состояния рассмотрена двумерная подалгебра из оптимальной системы. Базис операторов состоит из оператора галилеева переноса и оператора движения по спиральным линиям. В результате получены решения, описывающие прямолинейный разлет частиц газа с поверхности геликоида. Движения частиц по логарифмическим спиральям, лежащим на параболоиде, и движения по гиперболическим спиральям, лежащим на конусе (Юлмухаметова Ю.В.).

Проведен симметричный анализ стационарной двумерной вихревой подмодели для течений идеального газа с переменной энтропией. С помощью 4-х интегралов подмодель задается нелинейной системой дифференциальных уравнений 3-го порядка для функций тока и удельного объема. В системе имеется одна произвольная функция двух переменных, которая выражается через уравнение состояния и произвольных функций интегралов. Найденны преобразования эквивалентности. Перечислены произвольные элементы системы, при которых допускаемая группа расширяется. Построены оптимальные системы подгрупп этих групп. Приведены примеры инвариантных и частично инвариантных решений (Хабилов С.В.).

Относительно общей трехмерной подгруппы с 5-ю произвольными параметрами, содержащей все операторы галилеевых преобразований, рассмотрены все инвариантные решения с линейным полем скоростей для идеальной газовой динамики. Изучены движения частиц в целом. Каждая частица двигается по прямым линиям. В определенные моменты времени частицы собираются на линейных многообразиях коллапса. В зависимости от значений произвольных параметров могут быть несколько многообразий коллапсов. Перечислены все возможные случаи коллапсов частиц. Рассмотрены движения выделенных объемов частиц в виде параллелепипедов, которые проецируются в параллелограммы на многообразиях коллапсов. На примере уравнений газовой динамики у полученных решений изучено движение звуковых поверхностей в зависимости от уравнения состояния. Выведены уравнения движения звуковых характеристик для полученных инвариантных решений. Приведен пример звукового коноида простейшего решения (Хабилов С.В.).

Элементы группового анализа приведены для подмодели плоских установившихся изоэнтропических вихревых течений газа. Решена задача групповой классификации по произвольным элементам уравнения состояния и значениям интегралов Бернулли и вихря. Построены оптимальные системы подалгебр для двух четырехмерных алгебр Ли,

возникающих при групповой классификации. По оптимальной системе проведена классификация инвариантных решений для некоторых случаев групповой классификации. Дана физическая интерпретация некоторых решений (Хабилов С.В.).

Рассмотрены уравнения гидродинамического типа с уравнением состояния в виде давления, представленного как сумма функций плотности и энтропии. Для инвариантной подмодели 2-мерной подалгебры в виде линейной комбинации переносов, выбранной из построенной ранее оптимальной системы неподобных подалгебр, найдены интегралы системы, определен тип системы, система приведена к симметрическому и характеристическому видам, найдены точные решения, определены преобразования эквивалентности для линеаризованной системы, решена задача групповой классификации, построена оптимальная система неподобных подалгебр, применяются интегральные преобразования (Сираева Д.Т., Хабилов С.В.).

По двумерной подалгебре, содержащей проективный оператор и оператор растяжения по термодинамическим параметрам одноатомного газа, рассмотрена инвариантная подмодель ранга 2. Подмодель записана в каноническом виде, поэтому представление решения имеет нетривиальный вид. Получены инвариантные решения, безвихревые движения и серия простых решений с дифференциальными связями. Движения газа происходят без коллапса, во всем пространстве сначала сжимается, а затем разлетается до вакуума. Найденны движения сгустков газа подобные уединенным волнам (Хабилов С.В., Шаяхметова Р.Ф.).

Рассмотрена инвариантная подмодель уравнений газовой динамики, построенная на трехмерной подалгебре с проективным оператором в случае одноатомного газа. Подмодель сведена к уравнению Абея, для которого построена картина интегральных кривых. Для сепаратрисы седла исследовано приближенное решение. Это решение задает вихревой разлет газа по плоским кривым на поверхности вращения (Шаяхметова Р.Ф.).

Лаборатория «Робототехника и управление в технических системах»

*Заведующий лабораторией, д.т.н.
О.В. Даринцев*

На базе результатов моделирования кинематики, динамики и изучения свойств манипулятора, полученных в ходе выполнения гранта РФФИ № 15-08-02938-а, проведено параметрическое моделирование конструкции многозвенного манипулятора с управляемым изгибом, что позволило создать прикладное программное обеспечение



Рис. 5. Д.т.н., доцент Олег Владимирович Даринцев

для синтеза конструкции манипулятора с заданными эксплуатационными свойствами. Эксперименты с моделями и модернизированными полунатурными стендами позволили просчитать перспективы использования данного типа манипуляторов в медицине (стоматологии) и наметить план дальнейших работ по прототипированию данного оборудования.

Продолжены работы по синтезу методик использования технологий расширенной и виртуальной реальностей в робототехнике при синтезе специализированных информационных и управляющих систем. Получены предварительные результаты по реализации виртуальных синхронных информационных систем на базе разнородных (разнотипных) датчиков с использованием ПЛИС.

Синтезирована предварительная методика построения информационных систем на базе гибридных ПЛИС, что позволит получить не только синхронные данные с разнотипных датчиков, но и провести параллельную обработку информации непосредственно в ПЛИС с использованием встроенных 32-разрядных контроллеров.

Получены результаты реализации распределенных нейросетевых алгоритмов планирования траекторий мобильных роботов на базе трехуровневой информационно-управляющей системы с отдельными элементами облачных технологий (в качестве аппаратной платформы использовались результаты работы по гранту РФФИ № 16-29-04165-офи_м). Получены результаты моделирования течения жидкости в плоском канале

с гидросопротивлением для двух случаев динамического изменения геометрии канала: поперечное сжатие проходного отверстия гидросопротивления (течение вызывается приложенным к слою перепадом давления) и продольное движение гидросопротивления вдоль канала (течение вызывается продольным движением зоны сжатия). Полученные результаты могут быть использованы для разработки элементов вычислительного стенда перспективных микроустройств, исполнительных и захватных. В дальнейшем планируется провести исследование течения жидкости в деформированном внешним воздействием канале из гиперупругого материала и учесть воздействие поверхностного натяжения на формирование капли на выходном конце канала.

Разработан алгоритм с заданной динамикой изменения геометрии для определения диапазона возможностей решения такого рода задач, поскольку при численном моделировании в системах с изменяемой геометрией необходимо контролировать перестроения расчетной сетки с сохранением точности расчетов.

При разработке компьютерной модели элемента применены интерполяционные методы для различных наборов входных параметров (ширина проходного отверстия, градиент давления, вязкость) для аппроксимации отклика системы (расход рабочей жидкости). Ранее данный подход к решению подобного рода задач не применялся.

Выполнен синтез математической модели газотурбинного двигателя (ГТД) на основе матричного подхода с помощью нейронных сетей, новизна которой состоит в использовании двух нейронных сетей, что позволяет использовать при моделировании весь диапазон динамической характеристики двигателя, представленной в виде совокупности взаимосвязанных матриц. Благодаря использованию графоаналитического метода построен алгоритм управления ГТД на режиме разгона с последующим переходом на режим стабилизации, реализующий разгон и выход на режим стабилизации за минимальное время при точности 0,3 %.

Разработана структура роботизированного комплекса, включающего в себя установки получения топлива, а также материалы с заданными свойствами.

Модифицирован сетевой метод моделирования системы топливопитания ГТД: введены зависимости изменения вязкости топлива от температуры рабочей жидкости, а также изменения сил трения на подвижных элементах с учетом используемого материала и конструкции. Получены новые экспериментальные результаты, под-

тверждающие изменения динамических характеристик дозаторов топлива и повышение сил трения, износа подвижных элементов. Разработан способ косвенного замера вязкости в процессе работы двигателя.

Получены две методики синтеза интеллектуальных алгоритмов распределения задач в группе мобильных роботов, проведены эксперименты по проверке работоспособности, робастности, точности полученных решений. Работы проводились в виде компьютерного моделирования и тестовых прогонов на экспериментальном оборудовании. Рассмотрены различные варианты состояния окружающей среды, группы роботов с идентичными и разными функциональными возможностями (гомогенные и гетерогенные коллективы), проверялась устойчивость систем к наличию возмущений. При оценке способности центра управления обслуживать достаточно большие группы роботов получено, что размер коллектива ограничен вычислительными мощностями и объемами запоминающих устройств, задействованных при решении поставленных задач. Нейросетевая реализация алгоритма планирования не ограничивает количество групп роботов, на которые будет распространяться процесс управления. Аналогичные исследования были также проведены и для метода планирования, реализованного на базе генетических алгоритмов (Даринцев О.В., Мигранов А.Б.).

Получен новый комплекс моделей кинематики и динамики для многозвенных манипуляторов с управляемым изгибом, с помощью которых исследованы различные режимы работы, получена зависимость конечного положения рабочей манипулятора от величины «преднатяга» рабочих тросов. Оптимизирована структура информационной системы манипулятора, в результате которой повышена точность определения внутренних параметров, скорость опроса датчиков и скорость обработки информации. На новые структуры и алгоритмическое обеспечение получены Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (Даринцев О.В., Богданов Д.Р.).

Получены новые методики синтеза интеллектуальных алгоритмов распределения задач в группе мобильных роботов с учетом специфики окружения, роботов-агентов и т.д. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с разработанными ранее системами планирования.

Продолжены исследования по созданию новых перспективных устройств микроманипулирования на базе капиллярного микрозахвата, в ходе которых выполнен анализ конструктивных схем аналогичных устройств, по результатам которого

синтезированы новая архитектура и конструкция микрозахвата. Получены новые методики синтеза конструкции и моделирования основных узлов капиллярного микрозахвата с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В отличие от известных пальцевых микрозахватов предлагаемая конструкция захвата не оказывает силового воздействия на объект манипулирования, что гарантирует отсутствие побочных деформаций и нарушения целостности и/или формы манипулируемой детали. Для минимизации размеров микрозахвата и повышения эффективности операций захвата-отпускания (сокращение времени операции) проведено моделирование работы различных конструкций микронасосов, использующих разные типы пьезоэлементов. Полученные расчетные формулы позволят синтезировать быстросчетные алгоритмы управления контуром охлаждения и реализовать систему управления захватом на критических режимах в режиме реального времени.

Проведен анализ новой предметной области — робототехнические комплексы диагностики трубопроводных систем малых размеров со сложной топологией, выявлены проблемы, показаны способы реализации управляемых перемещений в трубопроводах. Синтезированы математические модели, описывающие кинематику и динамику многосегментных мобильных роботов при движении по внутренней поверхности. Проведены эксперименты для уточнения параметров математических моделей.

Продолжены исследования и получены новые, более точные, модели манипулятора с управляемым изгибом, что позволило повысить скорость и точность расчетов. Полученные решения планируется использовать при синтезе информационной и управляющей систем. Модернизирован экспериментальный стенд (Даринцев О.В., Мигранов А.Б., Богданов Д.Р.).

Представлены результаты исследования новой модели топливной аппаратуры ГТД, полученной с использованием синтезированных когнитивных карт. Проведенный сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов показал совпадение расчетных значений при значительном (до 20–40 раз) сокращении времени расчетов. Сформирована методика синтеза и использования когнитивных моделей при разработке новых конструкций элементов топливной автоматики (Денисова Е.В., Сидоров С.П.).

Разработана методика синтеза интеллектуального алгоритма распределения задач в группе мобильных роботов. Отличительным признаком является то, что центр управления способен обслужи-

вать достаточно большие группы роботов, размер которых ограничен его вычислительными мощностями и доступными объемами запоминающих устройств. Предлагаемая нейронная сеть также не ограничивает количество групп роботов, на которые будет распространяться процесс управления. Несомненным преимуществом данной методики является то, что администратор сети может на этапе ввода обучающей выборки назначить повышающий или понижающий коэффициент одному из весов, тем самым указать, насколько важен для распределения задачи тот или иной параметр. Также стоит отметить, что данный метод отличается универсальностью, в рамках его реализации могут быть добавлены другие критерии, на основе которых будет производиться распределение задач.

Синтезирована новая конструкция капиллярного захвата, использующего микроэлемент Пельтье, жидкостную систему охлаждения и новые микродатчики температуры. Размеры устройства уменьшены более чем в 15 раз, площадь рабочей поверхности составляет всего 6 мм². С учетом специфики конструкции и работы захвата синтезирована новая архитектура системы управления.

Разработаны новые конструкции некоторых элементов топливной автоматики, в частности конструкция сервопоршня с антикавитационной поверхностью. Разработана модель ГТД в среде имитационного моделирования Simulink с использованием двух нейронных сетей на основе матричного подхода. Разработана модель сервопоршня для агрегата дозирования топлива на основе нейронной сети и матричного подхода. Искусственно введен параметр, характеризующий степень возможного расслоения статических характеристик сервопоршня, позволяющий учитывать такое расслоение. Введение данного параметра позволило использовать матричный подход и нейронную сеть к моделированию сервопоршня АДТ в среде имитационного моделирования Simulink. Полученная модель может использоваться при моделировании всей САУ БПЛА, что позволит улучшить качество управления системой в целом (Денисова Е.В., Черникова М.С., Сидоров С.П.).

Синтезирована новая конструкция многозвеного манипулятора с управляемым изгибом, проведено комплексное исследование. Для получения информации о натяжении и перемещении силового троса на входе и выходе узла сбора информации были установлены датчики углового положения (magneticrotaryencoder). Требования по снижению массы, веса и стоимости узла (соответственно использование корпусированного варианта датчика неприемлемо) выполнены за счет разработки но-

вой конструкции информационного узла, в которой вместо типовых датчиков углового положения их чувствительные элементы были интегрированы непосредственно в сам узел. Поданы две заявки на Свидетельства о регистрации программ.

При решении задачи моделирования и исследования гидросистем для микроробототехнических комплексов с учетом специфики конструкций и свойств рабочей жидкости исследованы различные режимы течения жидкости через трубку круглого сечения, сжимаемую пьезоэлементом по периодическому закону. Деформация трубки под воздействием пьезоэлемента рассчитывалась уравнениями линейной теории упругости для граничных условий Дирихле и Неймана.

Показано, что подбором давления пьезоэлемента на внешнюю часть трубки можно получить такую же деформацию внутренней части трубки, как и при задании перемещения поверхности контакта внутрь на определенную величину (зависимость является линейной), что означает взаимозаменяемость рассматриваемых граничных условий.

Изучены два режима течения жидкости в деформированной трубке: один конец трубки закрыт, течение индуцируется деформацией трубки; оба конца открыты, течение индуцируется как деформацией трубки, так и приложенным к слою перепадом давления. Первый режим позволяет провести тестирование компьютерной модели, а второй режим — предложить механизм дозирования жидкости, управляемый двумя параметрами (частотой сжатия пьезоэлемента и величиной перепада давления) (Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Даринцев О.В.).

Получены новые методики синтеза интеллектуальных алгоритмов распределения задач в группе мобильных роботов с применением муравьиных алгоритмов и нейросетей, выполнен сравнительный анализ полученных результатов с полученными ранее алгоритмами.

Проведена оценка влияния на эффективность охлаждения радиатора следующих параметров: геометрия внутренней камеры микрозахвата и радиатора, расположение входного и выходного каналов, вводимая в систему тепловая мощность, скорость течения жидкости во входном канале. Построены однопараметрические аналитические аппроксимации для зависимости температуры радиатора от времени, а также продолжительности «быстрого» переключения.

Разработана осесимметричная математическая и компьютерная модели пьезоэлектрического микронасоса, проанализированы источники погрешности и определена область применимости

модели. Определены параметры выхода микрона-сосо на рабочий режим.

Получены новые модели кинематики робототехнического комплекса диагностики трубопроводных систем малых размеров, на базе которых построены типовые шаблоны управляемых перемещений в различных сегментах при произвольной ориентации трубы и типовых фитингов. Синтезированы прототипы основных узлов конструкции модульного робота. Проведено компьютерное моделирование, определены ограничения на геометрию, размеры и подвижность отдельных модулей.

Получены новые модели манипулятора с управляемым изгибом, проведена модернизация экспериментального стенда.

Лаборатория «Экспериментальной гидродинамики»

Заведующий лабораторией к.ф.-м.н. А. Т. Ахметов

Среди многофазных сред можно выделить жидкости с анизотропными элементами в виде микроскопических включений, в частности дискообразных. Эритроциты (дискоциты) — деформируемые элементы, их анизотропные свойства проявляются при определенных гидродинамических условиях, в частности, при течении крови в микроканале со ступенчатым сужением. Биологическая дисперсия (кровь) состоит из плазмы на 55 % и форменных элементов на 45 %, из них 98 % эритроциты диаметром $d = 8$ мкм, толщиной 2–3 мкм, объемом 90 мкм^3 каждый, их плотность на 6 % выше плотности плазмы. Особенности течения биологической дисперсии изучались в разработанном методом мягкой фотолитографии микрожидкостном устройстве в виде ячейки Хеле–Шоу со ступенчатым сужением (6×1 мм с зазором 55 мкм с сужением $100 \times 50 \times 55$ мкм на середине ячейки) при



Рис. 6. К.ф.-м.н. Альфир Тимирзянович Ахметов

гидродинамических условиях, соответствующих человеческому организму.

Отработанная методика обработки результатов скоростной съемки путем измерения покадрового смещения эритроцитов позволила построить поле скоростей и области изменения ориентации дискоцитов в цельной крови. При течении одиночных дискоцитов удалось определить различие скоростей эритроцитов разной ориентации на различной глубине. При течении в сосуде со стенозом следует отметить перед входом в сужение область ускорения, а после выхода из сужения — область торможения. Течение идеальной жидкости при обтекании симметричных препятствий сугубо симметрично, что наблюдается и при течении вязких сред при малых числах Рейнольдса. Дисперсные среды с анизотропными элементами, плотность которых больше плотности несущей фазы, вносят асимметрию как в поле скоростей, так и в структуру течения. Следует отметить, что при течении разбавленной крови дискоциты ориентируются вдоль линий тока: в зоне ускорения — перпендикулярно плоскости ячейки Хеле–Шоу, в зоне торможения — параллельно. При течении цельной крови в зоне ускорения эритроциты ориентированы вдоль линии тока перпендикулярно к плоскости ячейки, после прохождения сужения в зоне торможения — перпендикулярно линиям тока и к поверхности модели. Образующаяся упаковка параллельных друг другу эритроцитов после прохождения цельной кровью стеноза позволяет предположить, что процесс тромбообразования более вероятен в области кровеносного сосуда, в котором ориентация движущихся дискоцитов перпендикулярна к линиям тока, т.е. после сужения.

Изучение распространения ударных волн в двух типах проппанта с близкими по размерам гранулами — *RCP* (ResinCoatedProppant) с полимерным покрытием и обычного проппанта — *P* показало значительную разницу скоростей распространения волн. Наличие оболочки снижает скорость распространения волн как в сухом проппанте, так и в водогазонасыщенном больше, чем на треть. В мелкодисперсных насыпках как из стеклянных шариков (100–250 мкм), так и из фракций песка в том же диапазоне размеров при насыщении водой поглощение ударных волн и их скорость существенно зависят от способа заполнения секции ударной трубы. При одной и той же концентрации водной фазы водогазонасыщенной дисперсии скорость и поглощение волн различаются до 40 % в зависимости от подготовки и способа заполнения секции. Такой необычный результат связан со степенью дробления газовой фазы в поровом пространстве.

Закономерности развития фронта при неустойчивом вытеснении нефти водой в ячейке Хеле–Шоу. Разработана установка с использованием методов визуализации для исследования течений в микроканалах, в том числе процессов вытеснения. Все элементы установки управляются с использованием компьютера и в синхронизированном виде сохраняются в его памяти (видеоизображения, показания датчика давления, весов и заданного расхода). Фрактальный анализ эволюции «вязких пальцев» при двух режимах вытеснения при постоянном перепаде давления и постоянном расходе позволил установить: 1) по мере внедрения пальцев размеры растущих кластеров увеличиваются и их фрактальная размерность тоже возрастает; 2) в режиме постоянного перепада давления зависимости $D(V/V_0)$ хорошо аппроксимируются степенными функциями, которые при кратном увеличении (2,5 раза) перепада давления практически совпадают, в то время, как экспериментальные зависимости в режиме постоянного расхода не поддаются такой аппроксимации и существенно отличаются как друг от друга, так и от режима постоянного давления. В режиме постоянного расхода более быстрый рост фрактальной размерности в сравнении с постоянным перепадом обусловлен более быстрым нарастанием кластеров из-за больших перепадов, возникающих на начальном этапе нагнетания с постоянным расходом. Качественный анализ картины вытеснения до прорыва показывает большую сплошность вытесняющей воды при постоянном расходе и более эффективное вытеснение при расходе 50 мкл/мин. В процессе вытеснения большее диспергирование вытесняемой фазы (нефти) происходит при постоянном перепаде давления, более эффективное вытеснение — при прохождении большего объема воды 10 объемов ячейки. Выявлено 4 этапа вытеснения нефти водой при постоянном перепаде, давления и заданном расходе: 1) до прорыва воды; 2) при закачке воды до 1 объема ячейки; 3) при закачке воды от 1 до 7 объемов ячейки; 4) дальнейшая закачка от 7 до 20 объемов ячейки. По темпам извлечения количество извлеченной нефти по отношению к прокачанной воде 1 этап — 1/1, 2 этап — 1/4, 3 этап — 1/30 и 4 этап — 1/200. Количественное сравнение эффективности вытеснения показывает: до прорыва наиболее эффективно вытеснение при постоянном расходе (50 мкл/мин), при больших объемах прокачки более 10 объемов ячейки — при постоянном перепаде давления (50 кПа) (Ахметов А.Т., Рахимов А.А., Валиев А.А.).

Скорость распространения слабых ударных волн в средах из стеклянных шариков и песка в зависимости от водонасыщенности. В ходе экспериментов выявлены следующие общие закономерности, которые характерны для случаев заполнения секции насыпных сред стеклянными шариками или песком: 1) с увеличением влагосодержания скорость распространения волн уменьшается; 2) вакуумирование водонасыщенной насыпной среды приводит к более, чем 7-кратному увеличению скорости волны. То есть микропузырьки кардинальным образом влияют на скорость распространения волн давления в пористой среде, насыщенной водой. Различия распространения волн давления в секции насыпных сред, заполненной стеклянными шариками или песком, насыщенным водой, состоит в следующем: превышение влагосодержания 95 % в песке приводит к увеличению скорости волны с 105 до 160 м/с, что не наблюдается в стеклянных шариках и связано с полидисперсным составом песка в сравнении со стеклянными шариками (Ахметов А.Т.).

Установлено, что ультразвуковое воздействие приводит к интенсификации фильтрационного процесса, даже после записания дисперсий течения в микроканалах возобновляется (Ахметов А.Т., Рахимов А.А., Валиев А.А.).

Способ зондирования насыпных сред в ударных трубах, непосредственно после воздействия ударной волны, с помощью переотраженной волны позволил установить, что наиболее значимые изменения обнаруживаются в насыпных средах при влажности до 5 % объема пор; при более высоких концентрациях действие ударной волны незначительно изменяет свойства насыпной среды; при концентрациях свыше 60 % возникают низкочастотные колебания вплоть до полного водонасыщения; в дегазированной среде при 100 % водонасыщенности у падающей и зондирующей волн эпюры на датчиках идентичны, что демонстрирует объективность метода (Ахметов А.Т.).

В процессе работы проводились экспериментальные исследования течения дисперсий, в том числе с анизотропными элементами. Разработанные и изготовленные методом мягкой фотолитографии микрожидкостные устройства с микроканалами различной топологии и геометрии использовались для физического моделирования стенозов и бифуркации кровеносных сосудов. Ячейки Хеле–Шоу использовались для моделирования пористой структуры и трещин нефтеносной породы. Для регистрации динамики дисперсий в потоке использовалась высокоскоростная микровидеосъемка.

Изучение условий проявления эффекта динамического запираания показало:

1. Увеличение содержания изотропных и анизотропных частиц приводило, помимо увеличения вязкости, к уменьшению времени наступления динамического запираания.

2. При одинаковом процентном содержании частиц у эмульсий, содержащих анизотропные включения — хризотил, время наступления запираания и объем протекшей эмульсии до запираания на порядок меньше, чем у эмульсий с содержанием аэросила. Удивительно, что при этом вязкость эмульсии с аэросилом даже выше, чем у аналогичной эмульсии с хризотилом. Это можно объяснить тем, что хризотил — анизотропный порошок со специфическим строением.

Сравнительное изучение вытеснения нефти водой и газом в ячейке Хеле–Шоу показало, что вытеснение водой более эффективно по сравнению с газом. Зависимость объема протекшей жидкости от времени имеет нелинейный вид. После прорыва как газа, так и воды, наблюдается локальное перераспределение давления, что приводит к дополнительному доизвлечению нефти. Эффективность вытеснения нефти в ячейке Хеле–Шоу повышается с увеличением постоянного расхода агента. Увеличение перепада давления ведет к уменьшению размеров диспергировавших остаточных целиков нефти.

При течении цельной и разбавленной (1 % эритроцитов) крови в микроканале, имитирующем стеноз сосудов было обнаружено:

1. В обоих случаях ориентация эритроцитов — вдоль линии тока в зоне ускорения перед стенозом.

2. После прохождения стеноза в зоне торможения цельной крови эритроциты ориентируются перпендикулярно к линиям тока, в разбавленной — параллельно линиям тока в плоскости ячейки Хеле–Шоу.

3. Скорости эритроцитов, измеренные на оси микроканала: в цельной крови после сужения ниже, чем до него, в разбавленной наоборот — существенно выше.

Образующаяся упаковка параллельных друг другу эритроцитов, после прохождения цельной кровью стеноза, позволяет предположить, что процесс тромбообразования более вероятен в области кровеносного сосуда, в котором ориентация движущихся дискоцитов перпендикулярна к линиям тока, т.е. после прохождения сужения (Ахметов А.Т., Рахимов А.А., Валиев А.А., Саметов С.П.).

Издательская деятельность

С 2017 по 2021 годы выпущены с 12 по 16 тома журнала «Многофазные системы». Том 12, вышедший в 2017 году, состоит из двух номеров журнала, которые включают в себя 38 статей по различным направлениям механики, дифференциальным уравнениям и роботехнике. Том 13, состоящий из двух номеров, включает в себя 18 статей по различным направлениям механики, дифференциальным уравнениям и роботехнике. В 2019 году уже удалось собрать том 14 из четырех номеров. В него вошло 36 статей по механике жидкости и газа, механике твердого тела и роботехнике. В 2020 (пандемийном) году журнал наполнился работами участников запланированной VII Российской конференции с международным участием «Многофазные системы: теория, эксперимент, приложения». Было опубликовано более 140 статей по различным направлениям механики. В 2021 году выпущено три номера 16 тома, в которых опубликовано 20 статей.

Наукометрические показатели

Докторские диссертации:

2018 год

Чиглинцева А.С. «Гидродинамические и теплофизические основы процессов разложения и образования газогидрата метана в технологиях добычи и хранения природного газа», 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Кандидатские диссертации:

2017 год

Рафикова Г.Р. «Математическое моделирование образования газогидратов в пористых средах с учетом диффузионной кинетики», 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

2018 год

Айтбаева А.А. «Математическое моделирование и идентификация вида и параметров закрепления конца стержня по собственным частотам его колебаний», 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Кулешов В.С. «Численное исследование свободной конвекции жидкости в термовязких средах с немонотонной зависимостью вязкости гауссовского типа», 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

2019 год

Низамова А.Д. «Устойчивость течения термовязких жидкостей в плоском канале с линейным профилем температуры», 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Никонорова Р.Ф. «Инвариантные подмодели одноатомного газа», 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Монографии:

Ильгамов М.А. Резонанс. М.: ООО «ИПЦ «Маска». Издание третье, дополненное. 2021. 254 с.

Патенты:

Ахметов А.Т., Елизарова В.А., Кислицын А.А. и др. Способ ликвидации ледяных, гидратных и гидратопарафиновых пробок в скважине // Патент № 1739011, кл. Е 21 В 43/00, 37/06. Б.И. № 21. 1992.

Зарегистрированные программы:

Богданов Д.Р. Программа для моделирования и синтеза специализированного цифрового компонента ПЛИС опроса датчика магнитного энкодера AS5048A. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2019613916 РФ, заявл. 11.03.2019, опублик. 26.03.2019.

Богданов Д.Р. Программа для моделирования и синтеза специализированного цифрового компонента ПЛИС (инкрементные датчики), версия 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612092, заявл. 31.01.2019, опублик. 11.02.2019.

Насибуллаева Э.Ш. Моделирование акустического рассеяния от коаксиальных сфер при внешнем воздействии // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618862 от 05.08.2020 г.

Юлмухаметов А.А., Шакирьянов М.М. Программа для вычисления внешней и внутренней присоединенных масс трубопровода, транспортирующей жидкость или газ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668941; заявл. 11.11.2021; регистрация в Реестре программ для ЭВМ 22.11.2021. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47434316>.

Юлмухаметов А.А., Шакирьянов М.М. Нелинейные изгибные колебания трубопровода с учетом внутренней присоединенной массы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669592; заявл. 10.11.2021; регистрация в Реестре программ для ЭВМ 30.11.2021. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47434976>.

Коробчинская В.А., Файзуллина Э.А. Определение параметров газочапельной смеси при ударно-волновом сжатии в результате точечного взрыва. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661096. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. 06.07.2021.

Коробчинская В.А., Гайнуллина Э.Ф. Расчет динамических характеристик ударных волн в газе, генерируемых сильным взрывом в постановке за-



Рис. 7. Вручение Благодарности Президента Российской Федерации С.Ф. Урманчееву

дачи Седова. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021661097. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. 06.07.2021.

Государственные награды и почетные звания сотрудников Института:

Благодарность Президента Российской Федерации за заслуги в развитии науки и многолетнюю плодотворную деятельность — С.Ф. Урманчеев (2018 г.)

Почетное звание Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации — Р.Х. Болотнова (2017 г.), А.Т. Ахметов (2021 г.), М.М. Шакирьянов (2021 г.)

Почетная грамота Министерства образования и науки Российской Федерации — Е.В. Денисова (2021 г.), К.И. Михайленко (2021 г.)

Почетная грамота Республики Башкортостан — А.Г. Хакимов (2021 г.), Ж.Г. Огуречникова (2021 г.)



Рис. 8. Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан С.В. Хабиров

Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан — С.В. Хабиров (2017 г.), В.Ш. Шагапов (2018 г.)

Почетная грамота Министерства финансов Республики Башкортостан — Ж.Г. Огуречникова (2021 г.)

Почетная грамота Министерства экономического развития Республики Башкортостан — Е.А. Хрулева (2021 г.)

Премия им. Р.Р. Мавлютова в области технических наук — С.Ф. Урманчеев (2021 г.)

Медаль им. Х.А. Рахматулина — награды Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике — М.А. Ильгамов (2017 г.), С.В. Хабиров (2017 г.), С.Ф. Урманчеев (2018 г.), Р.Х. Болотнова (2018 г.), В.Ш. Шагапов (2019 г.)

Список литературы

- [1] Урманчеев С.Ф. Институту механики Уфимского научного центра РАН — 15 лет! // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2007. Т. 5. С. 11–37.
<http://mfs.uimech.org/2007/pdf/uim2007.1.preface.pdf>
- [2] Урманчеев С.Ф. К двадцатилетию со дня основания ИМех УНЦ РАН // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. 2012. Т. 9, № 1. С. 8–10.
<http://mfs.uimech.org/2012/pdf/uim2012.1.preface.pdf>
- [3] Урманчеев С.Ф., Галимзянов М.Н., Огуречникова Ж.Г., Денисова Е.В., Бушуева Л.С., Юлмухаметова Ю.В. История становления и развития Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 2, № 1. С. 85–100.
eLIBRARY ID: 26181032
- [4] Галимзянов М.Н. К двадцатипятилетию со дня основания Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. xii–xxxvi.
DOI: 10.21662/uim2017.2.0ii