



ISSN: 2658–5782

Номер 3–4

2020

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Аналитический обзор трудов конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»

Урманчиев С.Ф.

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

Представленный аналитический обзор включает краткое описание трудов, присланных на конференцию «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения». Обзор состоит из семи тематических разделов, соответствующих направлениям исследований работ, представленных авторами. В перечень разделов, традиционно присутствующих на конференциях по многофазным системам, добавлен раздел «Микрогидродинамика и модели медико-биологических исследований», который отражает одну из наиболее интенсивно развивающихся областей науки и, в то же время, тесно связан с идеями и методами механики многофазных сред. Работы, представляющие такие новые направления, как исследования газовых гидратов и гидроразрыва пласта, вошли в раздел «Теория и практика многофазной фильтрации». В обзоре рассмотрено более шестидесяти работ, в которых достигнуты наиболее яркие результаты, и в наибольшей степени соответствующих духу конференции. Однако, отметим, что общее число присланных работ превышает сто двадцать.

Ключевые слова: многофазные системы, турбулентность, кавитация, волновые процессы, пористые среды, капли, пузырьки, фильтрация, теплообмен, гидродинамическая устойчивость, конвекция, микрогидродинамика, численные методы, газовые гидраты, гидравлический разрыв пласта

Представленные на конференцию «Многофазные системы» тезисы научных работ охватывают довольно широкий спектр исследований по различным вопросам теории, экспериментальных исследований и приложений механики многофазных сред. Разнообразие тем планировавшихся выступлений связано, прежде всего, с кругом научных интересов академика Роберта Искандеровича Нигматулина, в честь юбилея которого и готовилось проведение конференции.

По существу затронутых проблем большинство докладов можно отнести к следующим направлениям:

1. Многофазные потоки: турбулентность и кавитация в технологических процессах, установках и аппаратах;
2. Волновые процессы в дисперсных и пористых средах;

3. Динамика капель, одиночных пузырьков, пузырьков кластеров при акустическом и вибрационном воздействии;
4. Теория и практика многофазной фильтрации;
5. Теплообмен при течении неоднородных жидкостей, конвекция, и гидродинамическая устойчивость;
6. Микрогидродинамика и модели медико-биологических исследований;
7. Аналитические и численные методы в механике сплошных сред.

1. Многофазные потоки: турбулентность и кавитация в технологических процессах, установках и аппаратах

Фундаментальные исследования в области турбулентных течений многофазных потоков на основе метода фазовых полей были представлены

в работе Э.Е. Сона [1]. В ней приведён сравнительный анализ различных моделей турбулентности и предложены алгоритмы для их численной реализации. В экспериментальной части исследований обнаружен эффект левитации капель над нагретой поверхностью, для математического описания которого построена модель межфазных процессов с учётом неконгруэнтного равновесия межфазной границы. Проведённые экспериментальные и теоретические исследования привели к созданию корректной методики расчётов горения в рабочих каналах ЖРД и ПВРД.

В механике многофазных сред огромную роль играют особенности взаимодействия дисперсных частиц с поверхностью. При этом, как правило, частицы считаются сферическими, а их отражение от поверхности определяется на основе коэффициентов восстановления для скорости центра масс. Реальные частицы часто имеют призматическую форму или плоские грани, что может быть связано с кристаллической структурой материала, поэтому при их моделировании следует учитывать случайную ориентацию относительно поверхности в момент удара. В работе С.В. Панфилова и Ю.М. Циркунова [2] построена математическая модель для изучения рассеяния несферических частиц при отскоке, влияния параметров отражения на коэффициенты восстановления компонент скорости центра масс частиц. Авторами были построены пространственные индикатрисы рассеяния, а анализ результатов численного моделирования выявил существенную роль повторных ударов при отражении несферических частиц, причём потери кинетической энергии для несферических частиц оказались существенно меньше, чем для сферических.

Работа С.А. Груздя и М.А. Корепанова [3] посвящена важной задаче оптимизации состава ракетного топлива и геометрии сопла. Разработанная математическая модель процесса горения топлива предназначена для исследования течения многофазного потока с целью минимизации спонтанного осаждения оксида алюминия на стенках сопла. Результаты расчётов позволяют точно определить начало спонтанной конденсации и вычислить размеры сверхкритических кластеров частиц оксида алюминия, которые приводят к нештатным режимам горения.

Для измерения параметров потоков газожидкостных смесей в работе И.А. Давлетшина, А.Н. Михеева и их соавторов [4] представлена эталонная расходомерная установка и описаны принципиальные подходы при её разработке. В экспериментальной работе И.И. Гогонина,

А.И. Катаева и В.И. Сосунова [5] установлены неустойчивые режимы дистилляционной колонны криогенной установки и проведены исследования процесса захлёбывания. Результаты экспериментов были описаны зависимостями в безразмерных координатах.

Снижению уровня кавитации в рабочих частях гидротурбин и трубопроводных системах, содержащих газожидкостные смеси, посвящены работы Г.Р. Аветисяна [6] и его сотрудников [7]. Их идея состоит в применении многорежимных стабилизаторов давления и расхода жидкости. Следует отметить, что рабочие схемы защищены патентами.

Численное исследование особенностей истечения струи водяного пара из сосуда высокого давления и процесса формирования струи выполнено в работе Р.Х. Болотновой и Э.А. Нурисламовой [8]. Ими установлено, что причиной возникновения пульсаций в струйном течении, наблюдаемых в экспериментах других авторов, является образование тороидальных вихрей вблизи оси симметрии струи.

Задача, связанная с технологиями разделения суспензий, рассмотрена в работе Р.Р. Юлмухаметовой, А.А. Мусина и Л.А. Ковалёвой [9]. Математическая модель процесса гравитационного осаждения построена в одножидкостном приближении с учётом межчастичного взаимодействия. Результаты исследования зависимости величины осевшего слоя от физических параметров суспензии были сопоставлены с экспериментальными данными авторов.

Численное исследование структуры турбулентного газожидкостного потока в вертикальных трубах представлено в работе Т.В. Богатко, П.Д. Лобанова, М.А. Пахомова и П.К. Даса (P.K. Das) [10]. В ней обсуждаются результаты расчётов распределения воздушных пузырьков по сечению трубы, выполненные по различным моделям, созданным ранее. На основании сделанных оценок предложена новая модель, учитывающая достоинства предыдущих. В ней полидисперсность двухфазного течения описывается методом дельта-аппроксимации с учётом процесса дробления и коалесценции пузырьков. При этом используется эйлерово описание с учётом обратного влияния пузырьков на осреднённые характеристики и турбулентность несущей фазы. В итоге результаты расчётов продемонстрировали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

2. Волновые процессы в дисперсных и пористых средах

Вопросы идентификации результатов акустического зондирования нефтяного пласта требуют решения задач о взаимодействии акустических волн с различного рода неоднородностями. В этой связи в работе А.А. Губайдуллина, О.Ю. Болдыревой и Д.Н. Дудко [11] приведены результаты математического моделирования распространения волн в высокопроницаемом слое пористой среды, содержащем цилиндрическую полость заполненную жидкостью. Построены закономерности изменения скорости распространения сигнала и декремента затухания в зависимости от параметров высокопористого слоя.

Моделированию эффекта акустической ловушки для коагуляции и очистки резервуаров от дисперсных частиц посвящена работа Д.А. Губайдуллина, П.П. Осипова и Р.Р. Насырова [12]. Установлено, что максимальная скорость дрейфа частиц достигается на границе между образующимися в резонаторе вихрями Шлихтинга и Рэлея.

Были представлены работы по изучению эффектов воздействия ударных волн на пористые среды и пены. К этой категории работ следует отнести экспериментальное исследование А.Т. Ахметова, М.А. Азаматова и А.Ф. Мухаметзянова [13], связанное с эволюцией воздушной ударной волны, при её переотражении от границ насыпной пористой среды. Отмечается различие в показаниях датчиков в случаях пористой среды насыщенной жидкостью с микропузырьками и дегазированной жидкостью. Обнаружено, что наиболее сильное изменение структуры импульсов, проходящих через насыпную среду падающей и переотраженной волн, наблюдается именно в сухих насыпках.

В работе К.И. Башировой и К.И. Михайленко [14] представлены результаты численного исследования эволюции ударных волн в слое лёгких упругих гранулированных частиц. В случае отражения от наиболее лёгких гранул волна приобретает двухпиковую конфигурацию. По мнению авторов подобное поведение можно объяснить подвижностью гранулированной среды.

Изучение демпфирующих свойств водной пены в условиях ударного нагружения выполнено в работе Р.Х. Болотновой и Э.Ф. Гайнуллиной [15]. Термодинамические свойства газовой фазы описывались уравнением состояния Пенга–Робинсона, а водной фазы — уравнением Ми–Грюнайзена. В математической модели процесса были учтены динамическая вязкость, межфазный теплообмен, синерезис пены и ряд других физических факторов.

Установлено, что учёт такого явления как синерезис сопровождается уменьшением влияния диссипативных процессов и усиливает амплитуду ударной волны. Получено хорошее соответствие результатов расчётов с экспериментальными данными.

Несколько очень интересных работ были посвящены воздействию вибраций на двухфазные системы. Так, в работе Т.П. Любимовой и О.О. Фатталова [16] изучалось поведение сферических дисперсных частиц различной плотности, помещённых в водный раствор глицерина и подвергнутых горизонтальным вибрациям. Установлено, что при некоторых значениях амплитуды скорости вибраций частицы формируют устойчивые периодические структуры в виде линейных цепочек или слоёв. А при высоких амплитудах скорости вибраций, напротив, происходило полное разделение фаз: все частицы собирались у одной из боковых стенок кюветы. В другой работе Т.П. Любимовой и её коллег [17] представлены исследования динамики кавитационных пузырьков вблизи твёрдых поверхностей с различными свойствами смачивания при воздействии ультразвука. В проведённых экспериментах было обнаружено, что динамика пузырьков вблизи твёрдой поверхности зависит от степени смачиваемости поверхности и от концентрации газа, растворенного в жидкости, например, гидрофобная поверхность тефлона способна удерживать большее число парогазовых пузырьков, которые остаются у поверхности даже после отключения ультразвука.

Особенности влияния вибраций на тепловую конвекцию в двухслойной системе, состоящей из слоя жидкости и пористой среды, насыщенной той же жидкостью, были исследованы в работе Е.А. Колчановой [18]. Численное моделирование задачи термовибрационной конвекции позволило установить, что в двухслойной системе конвекция может возникнуть либо в виде длинноволновых валов, охватывающих все слои, либо в виде коротковолновых валов, локализующихся только в слое жидкости над порами. Кроме того, показано, что в условиях невесомости с ростом угла ориентации оси вибрации должен происходить резкий переход от длинноволновой термовибрационной конвекции к коротковолновой. При продольной вибрации отмечено проникновение осреднённого течения в пористый слой.

В работе Н.В. Колчанова и Е.А. Колчановой [19] при изучении тепловой конвекции в аналогичной двухслойной пористой системе с ростом относительного числа Рэлея обнаружены осцилляционные режимы из-за дополнительных конвективных валов, образующихся сначала в верхнем

тонком слое жидкости, а затем и в пористой зоне вблизи нижней горячей границы системы. Вследствие этого и тепловой поток вовлекается в режим пульсаций с амплитудой, достигающей до 40% от среднего значения.

3. Динамика капель, одиночных пузырьков, пузырьков кластеров при акустическом и вибрационном воздействии

На конференциях «Многофазные системы», проводимых в г. Уфе, неизменный интерес вызывали и вызывают работы по исследованию коллапса пузырьков при воздействии интенсивных акустических полей. На седьмой по счёту конференции в этом направлении были представлены исследования А.А. Аганина и его коллег. Так, в работе А.А. Аганина и Т.Ф. Халитовой [20] приведён краткий анализ работ по явлению сверхсильного сжатия пузырьков в различных жидкостях и выявлены механизмы усиления ударной волны, одним из которых является медленный рост возмущений на поверхности пузырька. К таким жидкостям относится, например, ацетон и другие органические жидкости. В работе на основе численного моделирования проведён анализ процесса схождения пузырька в ацетоне и тетрадекане. Установлено, что нарушение сферичности ударных волн в пузырьках возникает из-за наличия малой начальной несферичности, которая задавалась в виде чётных сферических гармоник.

В работе Д.Ю. Топоркова [21] предложена модификация широкодиапазонного уравнения состояния Нигматулина–Болотновой для проведения численных расчётов динамики пузырьков при температурах ниже 663°K с учётом изменения термодинамических параметров, реализующихся в метастабильной области при высокоскоростном адиабатическом сжатии пара.

Хорошее соответствие данным эксперимента Лаутерборна и Курца (W. Lauterborn, T. Kurz, 2010) удалось получить в расчётах А.А. Аганина и И.Н. Мустафина [22], выполненных по модели парового пузырька с учётом фазовых превращений.

Взаимодействие акустических волн, наклонно падающих на поверхность жидкости, содержащей слой из многофракционных пузырьков, рассмотрено в работе Р.Н. Гафиятова [23]. Автором установлено, что увеличение угла падения приводит к уменьшению коэффициента прохождения и увеличению коэффициента отражения во всем диапазоне частот. В работе также представлен обзор литературы по различным моделям, описывающим распространение волн акустического диапазона в

слоистых пузырьковых системах.

В работе У.О. Агишевой и М.Н. Галимзянова [24] рассмотрено распространение малых возмущений в парогазовой смеси. В результате численного исследования получены линии границ устойчивости паровоздушных пузырьков в пространстве параметров для различных значений давления.

С применением сингулярного метода В.Л. Натягановым и С.А. Масловым [25] найдены решения ряда задач электрогидродинамики для сферических капель с поверхностным зарядом простого или двойного электрического слоя. Затем эти сингулярные решения методом осреднения по ансамблю возможных конфигураций были обобщены на однородные суспензии и получены их интегральные характеристики (такие, как эффективные значения вязкости, электропроводности и диэлектрической проницаемости).

Экспериментальному изучению динамического взаимодействия капель с поверхностью жидкости посвящено множество работ. В научной литературе описаны довольно детальные и тонкие эксперименты, выполненные, в частности, в Институте проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского под руководством Ю.Д. Чашечкина. Данные эксперименты получили достаточно подробное теоретическое обоснование. В этой связи нельзя не отметить работу А.Г. Терентьева [26], в которой предложена оригинальная математическая модель, описывающая основные события, сопровождающие падение капли на поверхность жидкости и дальнейший её распад.

Взаимодействие двух пузырьков различного радиуса в жидкости с заданной плотностью и вязкостью рассмотрена в работе А.Г. Петрова и Ш.В. Сандуляну [27]. В результате осреднения уравнений динамики пузырьков получено уравнение для зазора между пузырьками, а их притяжение или отталкивание связано со знаком осреднённой силы. Показано, что при отношении радиусов $1 \leq R_2/R_1 < 2.8$ пузырьки всегда сливаются для любого безразмерного параметра вязкости. А в работе Ш.В. Сандуляну [28] вычислены силы вязкого и невязкого взаимодействия двух пузырьков, пульсирующих в жидкости.

4. Теория и практика многофазной фильтрации

Вопросы многофазной фильтрации и математического моделирования разработки нефтяных месторождений оказались в центре внимания наибольшего числа исследователей, приславших свои работы на конференцию.

Методика построения и адаптации цифровой

3D модели месторождения представлена в работе В.А. Байкова и его коллег [29]. Безусловным достоинством этой работы является то, что параметры модели согласованы с фактическими данными эксплуатации скважин и исходной геолого-геофизической информацией. При записи замыкающих условий в системе уравнений фильтрации учитывалась необходимость синхронной корректировки параметров петрофизической, геологической и гидродинамической подмоделей с учётом истории разработки. Распознавание фаций проводилась методами машинного обучения, что способствовало повышению точности прогнозируемых параметров.

При решении проблем разработки низкопроницаемых трещиноватых битуминозных пластов с возможной генерацией жидких углеводородов в работе М.Н. Кравченко, Н.Н. Диевой и Е.М. Вожегова [30] создана гидроперколяционная математическая модель фильтрации с учётом химических реакций между скелетом и активными реагентами, а также перетоком подвижных углеводородов из матрицы в поровое пространство. Вычислительные эксперименты авторов продемонстрировали способность математической модели прогнозировать нефтеотдачу реальных месторождений при использовании термохимических методов их разработки с учётом совокупного влияния физико-химических процессов.

Для эффективного управления процессами извлечения нефти применяют потокоотклоняющие технологии с использованием полимерных и полимер-дисперсных растворов. В очень интересной работе К.М. Фёдорова, А.П. Шевелёва и других авторов [31] получено решение обратной задачи фильтрации полимерных оторочек, на основе которого построен алгоритм интерпретации экспериментальных данных. В результате, на основании экспериментальных исследований, авторами были определены константа адсорбции Генри, недоступный объём пор для полимера, фильтрационный коэффициент и ряд других важных фильтрационных параметров.

Экспериментальное исследование закономерностей процесса коагуляции частиц суспензии на модельных образцах насыпной пористой среды было выполнено в работе С.В. Димова [32].

Во многих задачах механики многофазных сред, например, при исследовании фильтрации в пористых средах возникает необходимость задания свойств среды. Так как физические параметры реальных пород распределены случайным образом, то, естественно, следует поставить задачу о её моделировании с помощью случайной плотной

упаковкой сферических тел, что и было сделано в работе А.В. Мишина [33].

В работе А.А. Валиева [34] проведено экспериментальное исследование развития неустойчивости Тэйлора–Сэффмана при вытеснении более вязкого флюида из пористой среды различными флюидами меньшей вязкости. Установлено, что при вытеснении дистиллированной водой и газом «вязкие пальцы» имеют сильно ветвящуюся структуру и центроориентированность. А при вытеснении раствором ПАВ — более широкий охват во входной зоне и, соответственно, меньшую остаточную нефтенасыщенность до прорыва, что связано с большим объёмом каждого «пальца». Исследование, связанное с процессом «доотмыва» высоковязкого флюида после прорыва вытесняющего агента проведено в работе А.А. Валиева и А.Д. Низамовой [35].

Пример визуализации вытеснения нефти предложен в работе А.И. Муллаянова и Ю.А. Питюк [36]. Модель пористой среды состояла из двух прозрачных пластинок, пространство между которыми было заполнено стеклянными шариками. Оценка водонасыщенности в процессе вытеснения была проведена на основе результатов цифровой обработки изображений.

Во избежание негативного влияния водонефтяных эмульсий в процессе добычи нефти группой авторов под руководством Л.А. Ковалёвой [37] выполнено исследование по воздействию неоднородного переменного низкочастотного электрического поля на систему типа «вода в масле». Для этой цели была изготовлена оптически прозрачная экспериментальная ячейка, позволяющая визуализировать коалесценцию микрокапель воды в эмульсии. В ходе экспериментов получены сведения о разделении эмульсии в зависимости от амплитуды и частоты электрического поля.

В работе А.И. Филиппова [38] в задаче об упругом режиме фильтрации вытеснения пластовой нефти представлена новая формула для коэффициента, характеризующего упругие фильтрационные свойства жидкой фазы в пористой среде. Применение полученной формулы, по мнению автора, позволит получать решения в задачах фильтрации в низкопроницаемых коллекторах, имеющие прозрачную физическую интерпретацию при предельных значениях пористости. Асимптотическое представление решения задачи о распределении давления в нефтегазовом пласте, содержащем участки с перфорацией, рассмотрено в работе А.И. Филиппова и П.Н. Михайлова [39].

Значительное внимание было уделено развитию численных и аналитических методов решения

задач фильтрации для их применения в корпоративных симуляторах. Так, в работе А.В. Жонина и Ю.В. Мартыновой [40] предложен подход к гидродинамическому моделированию с использованием тороидальной сетки для задач выбора систем разработки. В итоге, при решении задач оптимизации систем разработки месторождений, авторам удалось повысить точность, добиться существенного ускорения времени расчётов и корректной работы экономических опций.

Для оптимизации численного решения задач фильтрации с точки зрения соотношения точности и вычислительных затрат Т.Н. Киреевым и Г.Т. Булгаковой [41] предложен метод сеток Вороного в комбинации с двухточечной аппроксимацией потока.

Математическая модель фильтрации с дробными производными по пространственным переменным предложена Н.С. Белевцовым и С.Ю. Лукашук [42] для исследования течения флюидов в сложных неоднородных нефтегазовых пластах с естественной и техногенной трещиноватостью. При этом авторами использовалось дробно-дифференциальное обобщение закона Дарси с потенциалом Рисса. Ими показано, что для некоторых частных случаев исходную задачу путём разделения переменных можно свести к задаче типа Штурма–Лиувилля для дробно-дифференциального обобщения модифицированного уравнения Бесселя и получить автомодельные решения.

Исследования фильтрационных процессов актуальны не только в связи с разработкой нефтяных и газовых месторождений, но и при решении природоохранных проблем. Например, работа Э.Н. Береславского и Б.А. Мкртчяна [43] посвящена изучению режима грунтовых вод в каналах, заполненных водой, с учётом фильтрации, как через дно, так и через откосы. Во внимание было принято также испарение со свободной поверхности. При исследовании течения была сформулирована смешанная краевая многопараметрическая задача теории аналитических функций, решение которой было получено с помощью метода П.Я. Полубариновой-Кочиной. Для заданных граничных условий для задачи подземной гидромеханики разработан алгоритм расчёта размеров зоны насыщения, а также искомого фильтрационного расхода. Решение авторам удалось получить в замкнутой форме.

В работе С.И. Перегудина, Э.С. Перегудиной и Е.С. Холодовой [44] поставлена задача о волновом взаимодействии потока жидкости с сыпучим дном и в предположении малых амплитуд получено её

аналитическое решение. Определены условия волнообразования на сыпучей поверхности.

Исследования процессов фильтрации затрагивает и тематику, связанную с газовыми гидратами. Как объект исследования они обладают уникальными свойствами, дающими возможность широкого их применения в топливной энергетике. Природные отложения гидрата метана могут стать предметом разработки углеводородного сырья уже в ближайшем будущем. При этом газовые гидраты можно не только добывать, но и производить с целью хранения природного газа. В работе Н.Г. Мусакаева, М.К. Хасанова и А.А. Губайдуллина [45] установлены принципиально важные для практики критерии образования газовых гидратов в объёмной области при нагнетании газа в пористый коллектор, насыщенный газом и водой. Во-первых, коэффициент пьезопроводности пласта должен быть больше его коэффициента температуропроводности, а во-вторых, давление, под которым газ закачивается в пористый коллектор, должно быть выше, чем равновесное давление гидратообразования при температуре пласта в исходном состоянии. Иначе гидратообразование будет происходить на фронтальной поверхности.

Численному моделированию процесса образования гидрата при продувке холодного газа через слой снега посвящена работа С.В. Беловой, А.С. Чиглинцевой и О.В. Дударевой [46]. На основании расчётных данных по одномерной равновесной модели авторами отмечается, что с уменьшением проницаемости массива образование гидрата происходит интенсивнее, понижение температуры снежного массива приводит к интенсификации перехода снега в гидратное состояние.

Разработка газогидратных месторождений и использование газовых гидратов сопряжены с вопросами пожаро- и взрывобезопасности. Поэтому работы И.К. Гималтдинова и М.В. Столповского [47, 48], посвящённые моделированию горения газовых гидратов, также представляют практический интерес.

В технологиях добычи нефти гидравлический разрыв пласта занимает особое место и активно применяется на практике. Естественно, что ряд работ, представленных на конференции, был посвящён различным аспектам изучения особенностей развития трещин в пористых средах. В последнее время (в свете значительных достижений в численном моделировании гидроразрыва) появился интерес к лабораторным исследованиям этого процесса. Изучению гидроразрыва на модельной установке посвящена работа Г.В. Белякова, А.А. Таировой и других авторов [49]. На основе сравнения экс-

периментальных наблюдений с проницаемыми и непроницаемыми пористыми средами авторами сделан вывод об отсутствии влияния фильтрации жидкости на процесс образования и распространения трещины. Кроме этого, ими получена зависимость проницаемости среды от давления, имитирующего в установке горное давление.

Известно, что в коллекторах с малой проницаемостью и большой вязкостью нефти продолжительность нестационарных процессов перераспределения давления может быть одного порядка с характерным временем фильтрации между скважинами. Это обстоятельство привело к необходимости развития теории нестационарной фильтрации в пластах с трещинами гидроразрыва, которая и была представлена в работе И.Л. Хабибуллина и А.А. Хисамова [50]. Решения рассмотренных краевых задач были получены методом преобразований Лапласа.

Ряд задач по моделированию фильтрации в трещинах гидроразрыва пласта был рассмотрен в работах В.Ш. Шагапова и его коллег [51–53]. Так, на основе предложенного метода последовательной смены стационарных состояний получены формулы для изменения давления в трещине и объёмного расхода флюида на единицу высоты трещины при переменных режимах работы скважины.

Замечательный пример приложения идей механики многофазных сред в решении проблем биотехнологии приведён в работе А.А. Саламатина и А.Г. Егорова [54]. Ими рассмотрен технологический процесс извлечения ценных биологически активных соединений из молотого растительного сырья, называемый сверхкритической флюидной экстракцией, и разработана математическая модель для интерпретации данных эксперимента и прогнозирования стоимости конечного продукта с учётом полидисперсности молотого сырья.

5. Теплообмен при течении неоднородных жидкостей, конвекция, и гидродинамическая устойчивость

Во многих задачах гидродинамики многофазных течений ключевым фактором в развитии динамических процессов является теплообмен. Естественно, что вопросам, связанным с изучением взаимодействия гидродинамических параметров потока с температурными полями, уделено должное внимание и в работе конференции.

М.А. Пахомовым и В.И. Тереховым [55] было представлено обширное исследование, посвящённое численному моделированию двухфазного турбулентного пристенного потока в системах теплозащиты энергетических установок. С помощью раз-

работанного алгоритма решения задачи в трёхмерной области была изучена структура течения и тепловая эффективность газочапельной завесы при её вдуве через наклонные цилиндрические отверстия в рабочий канал. В математической модели перенос компонент Рейнольдсовых напряжений производился с учётом двухфазности течения. Авторами показано, что при добавлении капель в поток пристенного охладителя происходит значительное увеличение эффективности тепловой завесы: она возрастает практически в два раза по сравнению с однофазным течением, что даёт основание считать такие завесы перспективными с точки зрения их применения на практике.

В периоды протаивания мёрзлых грунтов для их стабилизации используются охлаждающие устройства — термостабилизаторы. Но в этих случаях в пористой среде возникают градиенты температуры, вызывающие конвективное течение. Оценке влияния конвективного теплопереноса на процесс охлаждения водонасыщенной пористой среды посвящена работа О.А. Симонова и Л.Н. Филимоновой [56]. Определён критерий, при котором вклад конвекции в переносе тепла может стать преобладающим. Авторами учтена особенность изменения плотности воды, обусловленная наличием максимума в окрестности $+4^{\circ}\text{C}$.

В работах А.Ф. Пашали и В.Г. Михайлова [57] разработаны методы расчёта гидравлического сопротивления участка трубопровода с учётом влияния теплопереноса и структуры течения смеси вода–нефть, что имеет большое значение при проведении гидравлических расчётов промышленных трубопроводных систем, проложенных на реальном рельефе.

Определение критерия устойчивости течения жидкостей, в которых вязкость испытывает существенное изменение в рабочем диапазоне температур, выполнено в работе А.Д. Низамовой, В.Н. Киреева и С.Ф. Урманчеева [58]. Установлено снижение критического числа Рейнольдса при увеличении параметра термовязкости — показателя степени в экспоненциальной зависимости вязкости от температуры и, соответственно, увеличение области неустойчивых режимов течения жидкости в каналах с достаточно интенсивным теплообменом.

6. Микрогидродинамика и модели медико-биологических исследований

Формирование современных представлений о развитии гидродинамики существенным образом связано с проблемами микрогидро-

динамики, в частности, при создании микрожидкостных устройств. В работе Г.В. Барткуса и В.В. Кузнецова [59] отмечается, что именно эти устройства являются мощным инструментом для развития эффективных и ресурсосберегающих технологических процессов. Их исследование направлено на изучение детальной структуры двухфазного газожидкостного течения в микроканале, для определения его локальных характеристик методом LIF (Laser-Induced Fluorescence), в результате чего была выявлена зависимость толщины пленки жидкости от расхода газовой и жидкой фаз.

При рассмотрении ламинарных и турбулентных течений в ячейке Хеле–Шоу в длинноволновом приближении в работе В.Ю. Ляпидевского и А.А. Чеснокова [60] была решена задача о формировании слоя смешения и турбулентной струи в микроканалах.

Работа В.Я. Рудяка и Д.С. Третьякова [61] посвящена экспериментальному исследованию вязкости и реологических свойств наножидкостей, их теплопроводности и электропроводности. Авторы обнаружили, что при увеличении концентрации частиц наножидкости приобретают свойства псевдопластической или вязкопластической жидкости. Уменьшение размера частиц также способствует проявлению неньютоновских свойств наножидкостей. Кроме того, показано, что на реологию наножидкостей с углеродными нанотрубками существенно влияет температура, причём с увеличением температуры растёт параметр консистентности.

В работе, представленной группой авторов под руководством Д.Б. Хисматуллина [62], предпринята попытка определения миграционного потенциала раковых клеток. С этой целью была разработана и изготовлена миграционная ячейка, в которой удалось установить ряд закономерностей, связанных с активностью раковых клеток и зафиксировать их миграцию по направлению градиента концентрации хемоаттрактанта в микроканалах.

Исследования в области медико-биологических проблем, связанных с системой кровеносных сосудов и капилляров, также является перспективной сферой приложения механики многофазных систем. Об этом свидетельствует работа коллектива под руководством А.П. Чупахина [63] по математическому моделированию течения крови в сосудах головного мозга при наличии аномалий типа церебральных аневризм. Рассмотрены конфигурации кровеносного сосуда с различными параметрами аневризмы. Модель предусматривает анализ полной энергии гидроупругой системы, складывающейся из энергии потока крови, упругой энер-

гии стенки сосуда и энергии её изгиба. На основе численного анализа с использованием промышленного пакета ANSYS CFX получены диаграммы, связывающие давление и скорость потока в модельной гидроупругой системе. Впервые результаты вычислительного эксперимента удалось совместить с данными наблюдений внутрисосудистого мониторинга кровотока, проводимого авторами совместно с нейрохирургами Национального медицинского исследовательского центра им. академика Е.Н. Мешалкина (Новосибирск).

7. Аналитические и численные методы в механике сплошных сред

Развитие методов решения дифференциальных уравнений является одной из основных задач механики. Мощным инструментом построения частных решений является симметричный анализ. В этом направлении С.В. Хабировым [64] была представлена работа по изучению инвариантных решений с линейным полем скоростей для идеальной газовой динамики. У полученных решений изучено движение звуковых поверхностей в зависимости от уравнений состояния и выведены уравнения для звуковых характеристик. В работе Ю.В. Юлмухаметовой [65] построено точное решение, описывающее прямолинейный разлёт частиц газа и найдены моменты коллапса частиц этого газа. Для системы уравнений газовой динамики с уравнением состояния одноатомного газа Р.Ф. Никаноровой [66] определены условия, при которых можно построить инвариантные подмодели ранга 1, представляющие собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Д.Т. Сираевой [67] построены инвариантные подмодели ранга 1, представляющие собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений для уравнений гидродинамического типа.

Аналитическое исследование стационарных неоднородных экзотермических течений приведено в работе А.Н. Богданова [68]. Оно предполагает использование асимптотических разложений по малому параметру. Автором установлено: чтобы избежать явлений, связанных с тепловым кризисом при одномерном течении воздуха, изменение безразмерной скорости потока должно находиться в пределах $0.58 \leq u \leq 1$.

Концепция метода сглаженных частиц послужила для О.П. Стояновской и её коллег [69] основой при создании нового эффективного метода расчёта интенсивного межфазного взаимодействия в двухфазной полидисперсной среде для многожидкостной гидродинамики сглаженных частиц. Авторы на конкретных примерах продемонстриро-

вали, что метод позволяет получать высокую точность результатов моделирования с шагами по пространству и по времени, независимыми от малых параметров задачи.

Перечисленные работы отнюдь не исчерпывают всего перечня тезисов, присланных на конференцию «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения». В настоящий обзор были включены, прежде всего, работы, непосредственно относящиеся к проблемам механики многофазных сред.

Список литературы

- [1] Сон Э.Е. Гидродинамика и турбулентность многофазных течений // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 95.
- [2] Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. Рассеяние несферических частиц при отскоке от поверхности, обтекаемой потоком газозвеси // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 75.
- [3] Груздь С.А., Корепанов М.А. Математическая модель конденсации оксида алюминия в соплах // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 33.
- [4] Давлетшин И.А., Михеев А.Н., Михеев Н.И., Кратиров Д.В. Разработка эталонной расходомерной установки для потоков газожидкостных смесей // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 36.
- [5] Гогонин И.И., Катаев А.И., Сосунов В.И. Экспериментальное исследование режимов неустойчивости двухфазного потока в дистилляционной колонне // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 32.
- [6] Аветисян Г.Р. Устранение кавитационных явлений в рабочих частях гидротурбин // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 4.
- [7] Аветисян Г.Р., Гаспарян А.С., Симонян А.А. Управление волновыми и вибрационными процессами в трубопроводных системах содержащих двухфазную среду: жидкость–газ // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 5.
- [8] Болотнова Р.Х., Нурисламова Э.А. Исследование динамики кавитирующей струи // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 21.
- [9] Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Численное исследование ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости со взвешенными твердыми частицами в наклонном канале // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 124.
- [10] Богатко Т.В., Лобанов П.Д., Пахомов М.А., Das P.K. Моделирование динамики распределения пузырьков по сечению канала. Методы дельта-аппроксимации и Population Balance Equation // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 18.
- [11] Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Распространение волн в высокопроницаемом слое в пористой среде, пересекемом заполненной жидкостью цилиндрической полостью // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 34.
- [12] Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Насыров Р.Р. Акустические ловушки в резонаторе // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 35.
- [13] Ахметов А.Т., Азаматов М.А., Мухаметзянов А.Ф. Изменение структуры ударных волн в насыпных средах при переотражении // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 10.
- [14] Баширова К.И., Михайленко К.И. Об отражении ударной волны от гранулированного слоя средней концентрации // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 13.
- [15] Болотнова Р.Х., Гайнулина Э.Ф. Анализ влияния синергизма и реологических свойств водной пены на снижение интенсивности ударного воздействия // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 20.
- [16] Любимова Т.П., Фатталов О.О. Динамика двухфазных систем под действием горизонтальных вибраций линейной поляризации // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 60.
- [17] Любимова Т.П., Рыбкин К.А., Фатталов О.О., Кучинский М.А. Динамика парогазовых пузырьков в жидкости под действием ультразвука при различной концентрации газа растворенного в жидкости // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 59.
- [18] Колчанова Е.А. Нелинейная конвективная динамика жидкости в двойном слое с пористой зоной под действием высокочастотной вибрации в невесомости // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 54.
- [19] Колчанов Н.В., Колчанова Е.А. Конвективный эффект удвоения волнового числа в жидкостном слое с неоднородной пористой средой // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 53.
- [20] Аганин А.А., Халитова Т.Ф. Деформации ударных волн в кавитационных пузырьках в ацетоне и тетрадекане // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 7.
- [21] Топорков Д.Ю. Модификация уравнения состояния Нигматулина–Болотновой для случая высокоскоростного сжатия пара тетрадекана // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 100.
- [22] Аганин А.А., Мустафин И.Н. Импульс давления в жидкости при коллапсе кавитационного пузырька в воде // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 6.
- [23] Гафиятов Р.Н. Особенности падения акустических волн на слой многофракционной пузырьковой жидкости // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 28.
- [24] Агишева У.О., Галимзянов М.Н. Особенности устойчивости и акустических свойств перегретой жидкости с газовыми зародышами // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 8.
- [25] Натяганов В.Л., Маслов С.А. Сингулярный метод в задачах электрогидродинамики однородных суспензий сферических капель // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 71.
- [26] Терентьев А.Г. Пляшущие капли на воде // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 99.
- [27] Петров А.Г., Сандуляну Ш.В. Моделирование слияния газовых пузырьков в жидкости в пульсирующем поле давления // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 80.
- [28] Сандуляну Ш.В. Силы вязкого и невязкого взаимодействия пульсирующих в жидкости двух сфер вблизи их контакта // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 88.
- [29] Байков В.А., Коновалова С.И., Рыкус М.В., Абдрашитов К.Х., Байков И.В., Сакаев Р.Ф. Синхронизация подмоделей пластовых систем в рамках механики многофазных сред // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 11.
- [30] Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Вожегов Е.М. Моделирование изменения структуры порового пространства при термоокислотной обработке насыщенного коллектора // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 55.
- [31] Федоров К.М., Шевелев А.П., Кобяшев А.В., Захаренко В.В. Определение фильтрационных параметров раствора полимера и суспензии из решения обратных задач движения оторочек в пористой среде // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 109.
- [32] Димов С.В. Фильтрация суспензии в пористой среде // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 38.

- [33] Мишин А.В. Моделирование случайной плотной упаковки континуальными методами по описанию гетерогенных систем // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 66.
- [34] Валиев А.А. Развитие неустойчивого вытеснения при снижении поверхностного натяжения // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 24.
- [35] Валиев А.А., Низамова А.Д. Комплексное исследование вытеснения нефти водой в плоском канале // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 25.
- [36] Муллаянов А.И., Питюк Ю.А. Экспериментальное изучение вытеснения нефти пузырьковой жидкостью в модельной пористой среде // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 68.
- [37] Муллаянов А.И., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А. Воздействие неоднородного электрического поля наводо-нефтяную эмульсию в микрожидкостной ячейке // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 67.
- [38] Филиппов А.И. Эффект вытеснения жидкости скелетом при малой пористости // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 111.
- [39] Филиппов А.И., Михайлов П.Н. Асимптотические представления решения задачи о поле давления в несовершенном вскрытом нефтегазовом пласте // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 112.
- [40] Жонин А.В., Мартынова Ю.В. Гидродинамическое моделирование на тороидальной сетке в задачах оптимизации систем разработки // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 41.
- [41] Киреев Т.Ф., Булгакова Г.Т. Применение неструктурированной сетки Вороного для численного решения задач фильтрации // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 51.
- [42] Белевцов Н.С., Лукашук С.Ю. Исследование дробно-дифференциальной модели однофазной фильтрации с потенциалом Рисса // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 14.
- [43] Береславский Э.Н., Мкртчян Б.А. О режиме грунтовых вод при фильтрации из каналов в почвенном слое с нижележащим напорным горизонтом // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 17.
- [44] Перегудин С.И., Перегудина Э.С., Холодова С.Е. Волны в жидкости над деформируемой поверхностью // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 79.
- [45] Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К., Губайдуллин А.А. Необходимые условия формирования объемной области образования гидрата при закачке газа в насыщенный метаном и водой пласт // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 69.
- [46] Белова С.В., Чиглинцева А.С., Дударева О.В. Численное моделирование процесса образования гидрата при продувке холодного газа через слой снега // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 15.
- [47] Гималдинов И.К., Столповский М.В. Математическая модель процесса горения газогидрата // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 31.
- [48] Столповский М.В. Численное исследование горения сферической частицы гидрата // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 96.
- [49] Беляков Г.В., Таирова А.А., Юдочкин Н.А., Молокочев А.С. Образование и распространение ГРП в градиентном фильтрационном поле // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 16.
- [50] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Моделирование неустановившейся фильтрации в системе пласт-трещина гидроразрыва // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 114.
- [51] Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А. Собственные колебания жидкости при гидроударе в скважине, сообщаемой с пластом // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 118.
- [52] Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. Теоретические модели фильтрации жидкости в трещине ГРП // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 120.
- [53] Шагапов В.Ш., Фокеева Н.О., Мигранова З.Н. О фильтрации жидкости в трещине ГРП при переменных режимах работы скважины // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 121.
- [54] Саламатин А.А., Егоров А.Г. Асимптотическое представление кривой выхода масла при сверхкритической флюидной экстракции из полидисперсного зернистого слоя молотого высокоомасличного растительного сырья // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 86.
- [55] Пахомов М.А., Терехов В.И. Гидродинамика и теплоперенос в газокпельном пристенном турбулентном потоке // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 76.
- [56] Симонов О.А., Филимонова Л.Н. Конвективное течение воды в пористой среде вблизи вертикального охлаждающего устройства // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 92.
- [57] Пашали А.Ф., Михайлов В.Г. Разработка математической модели гидравлического сопротивления участка трубопровода с учетом влияния теплопереноса и структуры режимов водо-нефтяной смеси // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 78.
- [58] Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Устойчивость течения термовязкой жидкости в канале теплообменника // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 72.
- [59] Барткус В.Г., Кузнецов В.В. Исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах методом LIF // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 12.
- [60] Ляпидевский В.Ю., Чесноков А.А. Модели двухфазных и струйных течений в микроканалах // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 61.
- [61] Рудяк В.Я., Третьяков Д.С. Теплофизические свойства наножидкостей с обычными частицами и углеродными трубками // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 82.
- [62] Рахимов А.А., Ахметов А.Т., Валиев А.А., Саметов С.П., Данилко К.В., Хайруллина Р.Р., Хисматуллин Д.Б. Экспериментальное изучение миграции раковых клеток в двухуровневом микрожидкостном устройстве // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 81.
- [63] Маматюков М.Ю., Паршин Д.В., Хе А.К., Чупахин А.П. Энергия гидроупругой системы и ее приложения в церебральной гемодинамике // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 62.
- [64] Хабиров С.В. Об инвариантных движениях частиц общей трехмерной подгруппы всех пространственных переносов // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 115.
- [65] Юлмухаметова Ю.В. Точное решение подмодели на четырехмерной подалгебре, состоящей из галилеевых переносов по осям координат // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 125.
- [66] Никонорова Р.Ф. Инвариантные подмодели одноатомного газа на трехмерных подалгебрах с проективным оператором // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 73.
- [67] Сираева Д.Т. Точные решения уравнений гидродинамического типа // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 93.
- [68] Богданов А.Н. Некоторые аналитические подходы к математическому моделированию неоднородных экзотермических течений // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 19.
- [69] Стояновская О.П., Давыдов М.Н., Арендаренко М.А., Исаенко Е.А., Маркелова Т.В., Снытников В.Н. Эффективный метод расчета динамики полидисперсных газовзвесей с интенсивным межфазным взаимодействием в гидродинамике сглаженных частиц // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 97.



Analytical review of the proceedings of the conference "Multiphase Systems: Models, Experiment, Applications"

Urmancheev S.F.

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC of RAS, Ufa

The presented analytical review includes a short description of the papers sent to the conference "Multiphase Systems: Models, Experiments, Application". The review consists of seven thematic sections corresponding to the research areas of the works presented by the authors. The list of sections traditionally present at conferences on multiphase systems has been supplemented with a section on "Microhydrodynamics and Models of Biomedical Research", which reflects one of the most rapidly developing areas of science and, at the same time, is closely related to the ideas and methods of mechanics of multiphase media. The works representing such new directions as gas hydrate and hydraulic fracturing research were included in the section "Theory and practice of multiphase filtration". The review considers more than sixty works in which the most striking results have been achieved, and most consistent with the spirit of the conference. However, we note that the total number of submitted papers exceeds one hundred and twenty.

Keywords: multiphase systems, turbulence, cavitation, wave processes, porous media, drops, bubbles, filtration, heat transfer, hydrodynamic stability, convection, microfluidics, numerical methods, gas hydrates, hydraulic fracturing