

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова  
Уфимский научный центр  
Российская академия наук

# Тезисы докладов

VI Российской конференции  
«Многофазные системы:  
модели, эксперимент, приложения»  
и школы молодых ученых  
«Газовые гидраты — энергия будущего»

Уфа, 26–30 июня 2017 г.

УДК 531/537+519.6  
ББК 22.25  
Т29



**Многофазные системы:**  
модели, эксперимент, приложения  
ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

*Организаторы конференции:*  
*Федеральное агентство научных организаций (ФАНО России),*  
*Российская академия наук (РАН),*  
*Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов*  
*управления Российской академии наук (ОЭММПУ РАН),*  
*Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ),*  
*Правительство Республики Башкортостан,*  
*Академия наук Республики Башкортостан (АН РБ),*  
*ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН*

**Т29 Тезисы докладов VI Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты — энергия будущего».** Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2017. 127 с.

**ISBN 978-5-98755-219-3**

В настоящий сборник включены тезисы докладов, заявленных для участия в VI Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты — энергия будущего» (26–30 июня 2017 г.). Сборник включает в себя доклады по различным направлениям механики многофазных систем и ее приложениям.

УДК 531/537+519.6  
ББК 22.25

**ISBN 978-5-98755-219-3** © Учреждение Российской академии наук  
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова  
Уфимского научного центра РАН, 2017

© Издательство «Нефтегазовое дело», 2017

# Трехмерное моделирование дисперсных течений в различных областях ускоренным методом граничных элементов

Абрамова О.А.<sup>1</sup>, Питюк Ю.А.<sup>1</sup>,  
Гумеров Н.А.<sup>1,2</sup>, Ахатов И.Ш.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Башкирский Государственный Университет

<sup>2</sup> Institute for Advanced Computer Studies University of Maryland

<sup>3</sup> Центр Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам

Динамика одиночных включений (капель и пузырьков) зачастую определяет свойства и поведение макросистем и макрообъектов во многих технологических процессах. Поэтому понимание основ течений эмульсий и пузырьковых жидкостей играет большую роль в разработке новых технологий и развитии различных отраслей промышленности, значимых для российской экономики.

В работе рассмотрены математические модели трехмерного течения вязкой жидкости с деформируемыми дисперсными включениями (капли, пузырьки) в неограниченной области, в микроканалах различных форм, а также при контакте с твердой поверхностью при малых числах Рейнольдса. Разработан и реализован эффективный подход для решения указанных задач высокой вычислительной сложности, основной особенностью которого является применение метода граничных элементов для трехмерных задач, ускорение которого произведено как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPU и графические процессоры). Проведен ряд демонстрационных расчетов и параметрических исследований процессов, связанных с течениями эмульсий и пузырьковых жидкостей в различных областях.

Разработанные методы могут быть использованы для решения широкого класса задач, связанных с течениями дисперсных сред в микро- и наномасштабах, и исследования микроструктуры течений.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Центра Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам, Fantalgo LCC (Maryland, USA), гранта РФФИ № 16-31-00029.

# Численное моделирование импульсного воздействия кавитационной полости на тело

Аганин А.А.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Излагаются проблемы, применения и механизмы разрушительного воздействия кавитации на поверхности тел. Приводятся основные положения методики расчета импульсного воздействия кавитационных пузырьков на тело посредством высокоскоростных кумулятивных струй. Методика состоит из трех этапов. На первом этапе методом граничных элементов рассчитываются параметры струи в начале ее удара по телу или слое жидкости между пузырьком и телом. На втором этапе определяется нагрузка на поверхность тела. Ее расчет осуществляется методом конечных разностей без явного выделения контактной границы жидкость-газ с применением динамически адаптивных сеток. На третьем этапе методом С.К. Годунова рассчитывается динамика приповерхностного слоя тела и малые деформации его поверхности. Даны примеры расчетов, иллюстрирующие эффективность используемых на каждом этапе численных методов. Для демонстрации работоспособности методики в целом представлены результаты расчета импульсного воздействия на тело примыкающего к его поверхности кавитационного пузырька.

---

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 17-11-01135).

# Динамика расположенных в линию пузырьков газа в жидкости

Аганин И.А., Давлетшин А.И.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Рассматривается динамика газовых пузырьков в жидкости с центрами, расположенными на одной прямой. Применяется математическая модель, представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно радиусов пузырьков и радиус-векторов их центров. Учитывается влияние поверхностного натяжения, вязкости и сжимаемости жидкости. Давление в пузырьках изменяется по адиабатическому закону. Приводится ряд результатов расчета, иллюстрирующих особенности радиальных пульсаций пузырьков и их поступательного движения в жидкости при наличии акустического возбуждения.

# Возникновение ударных волн в кавитационном пузырьке при коллапсе

Аганин А.А., Топорков Д.Ю.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

С использованием простого критерия проводится исследование ряда сред относительно возникновения сходящихся ударных волн в полости коллапсирующего кавитационного пузырька при различных давлениях жидкости. Показано чередование этих сред по степени благоприятствования образованию ударных волн и, как следствие, наиболее сильному сжатию среды в пузырьке. Сделана оценка минимального значения давления жидкости, при котором в пузырьке возникает ударная волна. Для некоторых сред проиллюстрировано удовлетворительное согласование полученных результатов с результатами прямого численного моделирования коллапса пузырька с использованием полной гидродинамической модели и широкодиапазонных уравнений состояния, с учетом неравновесного испарения-конденсации на межфазной границе и нестационарной теплопроводности в паре и жидкости.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-11-01135).

# ENO-модификации метода С.К. Годунова для расчета линейных волн в теле

Аганин А.А., Хисматуллина Н.А.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Проведено численное исследование эффективности ENO- и TVD-модификаций метода С.К. Годунова второго порядка точности при расчете распространения линейных волн в упругом теле, их отражения от жесткой стенки и свободной поверхности и прохождения через искусственные границы расчетной области. Оценка эффективности проводится путем сравнения с результатами применения классического метода С.К. Годунова. С этой целью решен ряд одномерных и двумерных модельных задач динамики упругого тела в окрестности области воздействия на его поверхность нагрузки, характерной для ударного воздействия кумулятивной струи жидкости, рассмотрены как радиально сходящиеся, так и радиально расходящиеся продольные и сдвиговые волны.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-01-00433).

# Синтез структуры исполнительного уровня системы управления мобильной платформы робота с учётом специфики решаемой задачи

Алексеев А.Ю.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Исполнительный уровень системы управления мобильной платформы робота должен обеспечивать управление исполнительными устройствами платформы, сбор и обработку данных с необходимых датчиков, взаимодействие с верхним (командным) уровнем мобильной платформы. Кроме этого исполнительный уровень берёт на себя функции позиционирования роботов друг относительно друга для передачи энергии. Эффективная передача энергии требует строго определённого расположения приёмопередающих антенн друг относительно друга, что в свою очередь накладывает требования к точному взаимному расположению мобильных роботов участвующих в энергообмене.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-29-04165\_офи\_м).



# **Проявление анизотропии при течении эмульсий и крови в микроканалах с сужением**

**Ахметов А.Т.**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В работе рассмотрено течение эмульсий, их частичная деструкция и динамическое запираание. Показано, что условия течения в сосуде со стенозом являются аномальными по отношению к течению крови в сосудистой системе здорового организма. Разработано микрожидкостное устройство для физического моделирования аномальных условий течения биологической дисперсии и приведены результаты экспериментальных исследований. Рассмотрены случаи проявления анизотропных свойств крови при движении в микроканалах, которые повышают вероятность тромбообразования.

# Ударные волны в водогазонасыщенных насыпных средах

Ахметов А.Т.<sup>1</sup>, Азаматов М.А.<sup>2</sup>, Журов А.А.<sup>3</sup>,  
Уразгалиев А.А.<sup>4</sup>, Акчурин И.И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>2</sup> Салым Петролеум

<sup>3</sup> ООО «БашНИПИнефть»

<sup>4</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

В докладе представляются результаты исследования прохождения и отражения ударных волн в водогазонасыщенных насыпных средах. Говорится о неоднозначном влиянии концентрации газовой фазы в насыщающей среде. Особое внимание уделяется влиянию микропузырьков на поведение ударной волны. Рассмотрен вопрос о значении степени консолидации насыпной структуры на распространение ударных волн. Показаны возможные области применения результатов исследования.

# Аккумуляция энергии механического удара кристаллической решеткой неорганических веществ

Ахметшин Б.С., Садиков Э.И., Массалимов И.А.

Башкирский государственный университет

В работе приведены результаты измельчения и аккумуляции энергии для ряда неорганических веществ ( $S$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $Si$ ,  $CaO_2$ ,  $BaO_2$ ,  $BaTiO_3$ ,  $Y_1Ba_2Cu_3O_y$ ) в мельницах различного типа. Установлено, что результаты измельчения и механической активации зависят от природы вещества, интенсивности обработки и конструкции мельницы. Установлено, что интенсивная механическая обработка приводит в ряде случаев ( $S$ ,  $BaTiO_3$ ) к измельчению до наноразмеров. Но в большинстве случаев измельчение вещества происходит до микронных размеров, но этот сопровождается аккумуляцией избыточной энергии в веществах с ковалентными и ионно-ковалентными химическими связями в виде выраженных экзотермических пиков на кривых дифференциального термического анализа. Обнаружено, что процесс накопления энергии отсутствует в простейших ионных кристаллах —  $NaCl$ ,  $KCl$ . Выявлено также, что даже при прекращении процесса измельчения при продолжении механической обработки вещества наблюдаются существенные изменения интенсивности и формы экзотермических пиков, свидетельствующие о процессах обмена энергии между веществом и мельницей. Полученные результаты могут быть использованы при проведении процессов диспергирования реагентов для технологических процессов неорганического твердофазного синтеза с применением механически активированных реагентов.

# Идентификация вида и параметров дефекта

Ахтямов А.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Показано, что по конечному числу собственных частот изгибных колебаний балки можно идентифицировать не только параметры дефекта определенного вида (например, глубину трещины), но и вид дефекта (т.е. идентифицировать какой это дефект — трещина, полость, инородная масса, трещина и полость и т.п.).

# Плоские структуры упругого поля слабозакрученного нематика цилиндрической симметрии

Басырова Е.Р., Тимиров Ю.И., Скалдин О.А.

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

Исследование структуры и физических свойств неупорядоченных дисперсных систем различных типов на основе жидких кристаллов (ЖК) является одной из актуальных задач в области физики конденсированных сред. Интерес к этим объектам обусловлен тем, что ЖК обладают необычными, а в ряде случаев уникальными электрооптическими и механическими свойствами по сравнению с традиционными оптическими материалами. Кроме того в составе микродисперсных систем ЖК демонстрируют многочисленные сложные ориентационные структуры, часто включая топологические дефекты, которые легко контролируются изменением материальных параметров, граничных условий и внешних воздействий (электрические и световые сигналы; механические, тепловые и магнитные воздействия).

В данной работе экспериментально исследуются плоские структуры нового типа упругого поля в цилиндрическом капилляре слабозакрученного нематического ЖК. Эти структуры представляют собой линейные дисклинации силы  $m = 1$ , и были теоретически предсказаны и описаны в работе [V.K. Pershin and I.I. Klebanov. Crystallography Reports, Vol. 45, No. 2, 2000, pp. 307–309.]. Численно моделируются оптические картины этих структур, для сопоставления с экспериментально полученными данными.

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 15-02-09366, 17-42-020794 p\_a) и стипендии президента РФ СП-183.2016.1. В экспериментальных исследованиях использовалось оборудование ЦКП "Спектр"ИФМК УНЦ РАН и РЦКП "Агидель".

# Обеспечение эффективного использования энергоресурсов в группе мобильных роботов

Богданов Д.Р.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Одним из аспектов беспроводных технологий, наряду с беспроводной передачей информации между устройствами, являются способы и методы беспроводной передачи энергии устройствам, в частности, роботам. Традиционно, данный вопрос рассматривается с точки зрения восполнения энергоресурсов устройств (роботов) или их непрерывного питания внешними стационарными и мобильными источниками энергии.

В докладе рассматривается вопрос эффективного перераспределения имеющихся энергоресурсов в группе мобильных роботов между ее членами для решения поставленной перед ними коллективной задачи.

Ключевым моментом исследований является разработка методик и способов обмена энергоресурсами между отдельными роботами в соответствии с выбранной стратегией поведения группы. Для решения данной задачи авторами предлагается синтезировать интеллектуальную систему контроля и управления энергопитанием каждого робота, основными компонентами которой являются модуль беспроводного обмена энергией, система энергетического менеджмента и аппаратно-программный комплекс, реализующий уровень группового управления.

# **Анализ влияния межфазного контактного теплообмена на интенсивность ударных волн в водной пене**

**Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Проведен сравнительный анализ влияния контактного теплообмена между газовой и водной фазами на степень снижения амплитуды и скорости ударной волны в зависимости от задаваемых параметров в уравнении интенсивности теплообмена на примере численного решения задачи о сферическом взрыве в водной пене.

Межфазный теплообмен определяется особенностями дисперсной фазы, состоящей из жидких пленок, которые разрушаются на микрокапли за фронтом ударной волны и учитываются в модели следующими исходными параметрами: коэффициентом динамической вязкости газа, текущим диаметром микрокапель, определяющим площадь контактируемой поверхности газ-вода, числом Прандтля, объемным водосодержанием пены и разностью температур в фазах.

Верификация построенной модели газожидкостной пены осуществлена на основе экспериментальных данных E. Del Prete, Chinnaуа A., Domergue L. et. al. (2013) по ударному сжатию водной пены в результате сферического взрыва заряда ВВ.

# Моделирование процесса формирования потока вскипающей воды при разгерметизации сосуда высокого давления с использованием открытого пакета OpenFOAM

Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Численная реализация нестационарного процесса истечения вскипающей воды из тонкого сопла в двумерной плоской постановке проведена с применением пакета программного комплекса с лицензией открытого исходного кода OpenFOAM. Математическая модель рассматриваемой задачи включает баротропное уравнение состояния для жидкой и газовой фаз, уравнения неразрывности и Навье-Стокса для сжимаемой смеси и уравнение, определяющее плотность смеси по массовому содержанию компонент.

Решение задачи в пакете OpenFOAM осуществлено решателем `cavitatingFoam`, с использованием метода `PIMPLE`, состоящего из последовательности этапов, начиная с задания начального приближения для поля давления, вычисления поправки давления и корректировки полей скорости и давления с дополнительным их уточнением для удовлетворения линеаризованных уравнений неразрывности и количества движения. Визуализация результатов расчетов проведена с помощью открытой графической платформы `ParaView`.

Проведен сравнительный анализ численных решений для поставленной задачи с использованием пакета `OpenFoam` и ранее разработанного авторами метода сквозного счета на подвижных лагранжевых сетках.



# Численное решение уравнений модели развития трещины ГРП гиперболического типа

Булгакова Г.Т.<sup>1</sup>, Ильясов А.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup> ООО «РН-УфаНИПИнефть»

Моделируется процесс развития трещины ГРП, инициируемый закачкой ньютоновской жидкости в пласт при давлениях, превышающих давление разрушения породы. Для моделирования рассматриваемого процесса используется обобщение модели РКН (Перкинса–Керна–Нордгрена) гиперболического типа. Численное решение уравнений модели проводится методом С.К. Годунова первого порядка точности с использованием точного решения задачи о распаде произвольного разрыва уравнений представленной модели без диссипативных членов.

Численно исследовано влияние проницаемости породы и минимального горизонтального напряжения в породе на длину и ширину образующейся трещины ГРП. Проведено сравнение полученных численных решений с численным решением классической модели РКН параболического типа.

# Осредненная модель трехфазного течения в трещине гидроразрыва пласта

Булгакова Г.Т.<sup>1</sup>, Киреев Т.Ф.<sup>1</sup>, Хатмуллин И.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup> Уфимский научно-технический центр

При создании гидродинамических моделей месторождений углеводородов важной задачей является корректный учет влияния трещин гидравлического разрыва пласта (ГРП) на работу скважин. Для этого в гидродинамическом симуляторе необходимо учитывать течение внутри трещины с точным описанием ее геометрии.

Для проведения полномасштабного гидродинамического моделирования необходимо выбрать адекватную модель трещины ГРП с оптимальным соотношением ее вычислительной сложности и детализации физических процессов. Нередко давление в трещине падает ниже давления насыщения нефти, поэтому важно учитывать выделение газа из нефти в трещине.

В данной работе предлагается новая осредненная модель течения в трещине ГРП, учитывающая наличие трех фаз и эффекты разгазирования нефти. Движение смеси воды, нефти и газа в трещине описывается установившимся однофазным течением. Уравнения движения в пласте и в трещине решаются совместно по полностью неявной схеме, что обеспечивает абсолютную устойчивость решения. Модель легко встраивается в любой гидродинамический симулятор, поддерживающий обработку компонентов нелетучей нефти и полностью неявную схему расчета. Для моделирования течения в пласте используется неструктурированная сетка Вороного с локальным измельчением вокруг трещины, а для уравнений течения в трещине – одномерная сетка. В рамках численного эксперимента проведено сравнение решений, полученных с помощью новой осредненной и трехфазной моделей.

# Исследование тепловой конвекции углеводородной жидкости в замкнутой полости при высокочастотном воздействии

Бухмастова С.В., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет

Добыча, транспортировка и хранение сырой нефти связаны с накоплением нефтяных шламов. Данный тип отходов опасен для окружающей среды и подлежит переработке. Из-за высокой вязкости нефтяных шламов затрудняется их сбор и транспортировка к местам утилизации. Одним из перспективных и экономически выгодным методом по уменьшению вязкости нефтяного шлама является электромагнитный нагрев. В данной работе с помощью численной модели рассматривается воздействие высокочастотного электромагнитного поля на резервуар с углеводородной жидкостью.

Физическая модель представляет собой металлическую цилиндрическую емкость, в центре которой располагается металлический стержень – излучатель электромагнитной энергии. Боковая поверхность и торцы емкости теплоизолированы. Воздействие электромагнитного излучения в математическом уравнении учитывается введением источников члена, описывающего плотность распределенных источников тепла в нефтешламе. Тестирование программного кода показало хорошее совпадение численных результатов с известными аналитическими решениями.

В результате численного моделирования получены температурные поля и линии тока в нефтяном шламе при ВЧ ЭМ воздействии. Низкая температура и высокая вязкость вещества в начальный момент времени исключают возможность возникновения какого-либо движения жидкости. Поэтому в течение достаточно длительного времени после начала воздействия нагрев среды происходит только за счет распределенных источников тепла и механизма молекулярной теплопроводности. По истечении времени вблизи излучателя образуется прогретая до температуры текучести зона, достаточная для возникновения теплового движения жидкости, и тогда в процесс вступает механизм конвективного переноса тепла.

---

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-9398.2016.1.

# Эффективность неустойчивого вытеснения нефти из ячейки Хили–Шоу

Валиев А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Представлены результаты экспериментального исследования процесса неустойчивого вытеснения нефти флюидами из ячейки Хили–Шоу, представляющей собой физическую модель трещины в нефтяном пласте. Выделены два этапа вытеснения нефти: 1-ый до прорыва и 2-ой после прорыва вытесняющего флюида. Обнаружено существенное различие между развитием «вязких пальцев» воды и газа. Первые в начале прорыва разрываются, в то время как «газовые пальцы» сохраняют сплошность. Вязкие пальцы воды дают больший охват при вытеснении. Увеличение перепада давления в обоих случаях расширяет охват. После достижения выходного отверстия сильно активизируются периферийные пальцы, изгибаясь в сторону основного потока, в котором падает давление в момент прорыва. Активность периферийных пальцев существенно динамичнее при движении газа, помимо малой вязкости сказывается и упругость при больших перепадах давления. При большем перепаде давления, вытеснение одним и тем же объемом вытесняющего агента, приводит к значительному увеличению вытеснения как при использовании газа, так и воды. При одинаковых объемах прокачки, вода приводит к лучшему вытеснению. Фрактальная размерность «вязких пальцев» подчиняется степенному закону от времени.

# Распространение слабых возмущений в теплой воде с воздушными пузырьками

Вдовенко И. И.

Башкирский государственный университет

В работе изучено распространение слабых возмущений в водовоздушной пузырьковой среде, когда в пузырьках помимо нерастворимого в воде газа (воздуха) присутствуют пары воды, которые в процессе движения смеси могут конденсироваться. Находящийся воздух в пузырьках, при этом, будет оказывать диффузионное сопротивление на интенсивность фазовых переходов системы «пар-вода». Проанализировано влияние начальных параметров двухфазной смеси «вода-пузырьки» (объемного содержания фаз, размеров дисперсной фазы, а так же температуры воды) на эволюцию гармонических волн в пузырьковой жидкости.

Исследование гармонических волн в жидкости с паровоздушными пузырьками с размерами  $a_0 = 10^{-3}$  м показало, что при изменении равновесной температуры от  $t_0 = 293$  К до точки кипения  $T_0 = 373$  К, вблизи низких частот ( $\omega \leq \omega_{(R)}$ ,  $\omega_{(R)}$  — собственная частота пузырьков), коэффициент затухания меняется в десятки и сотни раз (в зависимости от частоты возмущений). В случае же мелкодисперсных смесей ( $a_0 = 10^{-6}$  м) изменение фазовой скорости и коэффициента затухания гораздо слабее (не более двух раз). Это связано со снижением роли фазовых переходов для мелкодисперсных систем из-за роста массовой концентрации газа в пузырьках, связанного с действием капиллярных сил на межфазной поверхности.

При высоких температурах (в частности, при точке кипения) зависимость фазовой скорости и коэффициента затухания при низких частотах ( $\omega \leq \omega_{(R)}$ ) от радиуса пузырьков может быть немотонной.

# **Задача о накоплении слоя частиц при течении суспензии в канале с мелкодисперсной сеткой**

**Воробьев Н.А.**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается течение суспензии в канале с мелкодисперсной сеткой. В канал подается суспензия с постоянной концентрацией дисперсной фазы. Сетка установленная в канале задерживает дисперсную фазу и пропускает дисперсионную. В результате, перед сеткой начинает скапливаться слой частиц. Исследуется динамика накопления слоя частиц и изменение физических параметров в слое

# Численное исследование динамики кластера, состоящего из пузырьков и твердых частиц

Гайнетдинов А.Р.<sup>1</sup>, Питюк Ю.А.<sup>1</sup>, Абрамова О.А.<sup>1</sup>,  
Гумеров Н.А.<sup>1,2</sup>, Ахатов И.Ш.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет

<sup>2</sup> Institute for Advanced Computer Studies University of Maryland

<sup>3</sup> Центр Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам

Кластеры, содержащие пузырьки и твердые частицы, имеют широкое практическое применение во многих областях промышленности. Так, например, изучение взаимодействия пузырьков с твердыми частицами может быть использовано в биотехнологиях и медицине, доставки лекарств к пораженным органам, в микроэлектронике и полупроводниковой промышленности для деликатной очистки микроповерхностей. Пенная флотация применяется для очистки воды от органических веществ и твердых взвесей, разделения смесей, ускорения отстаивания в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности. Поэтому изучение динамики пузырьков и частиц является актуальной задачей.

Несмотря на то, что существует множество работ, посвященных исследованию динамики пузырьков, динамика кластера, содержащего несферические пузырьки и твердые частицы малоисследована. Более того в большинстве теорий, связанных с динамикой пузырьков и частиц, трехмерными эффектами пренебрегается.

В работе рассматривается динамика пузырьков и частиц под действием акустического поля в трехмерной постановке. Для решения задачи разработан и протестирован алгоритм на основе метода граничных элементов для потенциальных течений. Проведен многопараметрический анализ для систем «пузырёк-частица», «частица-пузырек-частица», «пузырек-частица-пузырек», а также более сложных систем, содержащих несколько пузырьков и частиц. Анализ динамики пузырьков и частицы показал, что, как правило, при их взаимодействии они имеют тенденцию притягиваться друг к другу. Большое влияние на частицу оказывают гидродинамические потоки, создаваемые осциллирующим пузырьком. Стоит отметить, что частица также оказывает влияние на динамику пузырька, особенно во время его сжатия.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Центра Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам, гранта РФФИ № 16-31-00029, гранта Президента РФ МК-3503.2017.8.

# Разработка и внедрение струйных гидравлических смесителей для интенсификации процессов смешения нефти, нефтепродуктов в трубах или емкостях

Галиакбарова Э.В.<sup>1,2</sup>, Галиакбаров В.Ф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup> ООО НПП «НТ-Центр»

При подготовке, транспорте, хранении нефти или нефтепродуктов используют различные перемешивающие устройства. Известные статические и динамические смесители малоэффективны. Одни из них используют электропотребляющие агрегаты, поэтому является энергоемкими. Другие используют преграды различной геометрии, которые приводят к турбулизации потоков, но их гидродинамическая мощность смешения также недостаточна для эффективной гомогенизации жидкостей, используемых далее в технологических процессах.

Разработаны струйные гидравлические смесители (СГС), позволяющие увеличить гидродинамическую мощность смешения в 10 раз по сравнению с известными смесителями.

Проведены опытно – промышленные испытания СГС на предприятиях ПАО «НК Татнефть», ПАО «НК Башнефть», ПАО «НК Роснефть» под руководством Лауреата премии правительства РФ в области науки и техники, д. т.н., В.Ф. Галиакбарова.

После обработки статистических данных опытно – промышленных испытаний СГС найдены диапазоны изменения критериев подобия гидродинамических и массообменных процессов, определяющие эффективное перемешивание нефти, нефтепродуктов в установках подготовки на промыслах, а также в резервуарах хранения.



# Двумерные волны давления в пузырьковой жидкости

Галимзянов М.Н., Агишева У.О.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается задача о воздействии волны давления конечной длительности в жидкости на твердую стенку, покрытую пузырьковой областью. Изучаются особенности динамики волны в жидкости и нелинейные эффекты, которые могут возникнуть при воздействии на твердую стенку.

Проанализированы зависимости эффектов гашения и усиления волны в пузырьковой области от её протяженности и начального объемного содержания газовой фазы. Рассмотрен случай неоднородного распределения по длине и в поперечном направлении пузырьковой области начального объемного содержания пузырьков.

По результатам численных расчетов установлено, что пузырьковая завеса в пристеночной области может как гасить, так и усиливать амплитуду падающего сигнала. При надлежащем подборе параметров пузырьковой области (газосодержания, радиуса пузырьков, протяженности) можно практически исключить ударно-волновое воздействие на стенку. Также установлено, что в рассматриваемом диапазоне данных необходимая для гашения волнового сигнала протяженность пузырьковой области определяется начальным объемным газосодержанием, например, пузырьковая область протяженностью 0.2 м с начальным объемным газосодержанием 0.01 имеет такие же характеристики по гашению сигнала, как пузырьковая область протяженностью 1 м с начальным объемным газосодержанием 0.001.

Было установлено, что в рассматриваемом диапазоне объемных газосодержаний от 0.0001 до 0.001 направление изменения газосодержания по длине завесы не вносит существенной различий в динамику волнового сигнала в завесе. Данный результат связан с тем, что при переходе от меньшего объемного газосодержания к большему (от 0.0001 к 0.001) эффект увеличения амплитуды (при 0.0001) плавно переходит эффект гашения (при 0.001), и наоборот для противоположного случая.

Авторы выражают благодарность академику АН РБ, д.ф.-м.н., профессору Владиславу Шайхулагзамовичу Шагапову за полезные замечания и постоянный интерес к исследовательской работе авторов.

---

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-79-30059.

# Моделирование самоорганизации пузырьков в жидкостях под действием ультразвука методом граничных элементов

Гильманова Г.И.<sup>1</sup>, Гумеров Н.А.<sup>1,2</sup>, Ахатов И.Ш.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет, Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем

<sup>2</sup> Institute for Advanced Computer Studies University of Maryland

<sup>3</sup> Центр Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам

Самоорганизация пузырьков в акустическом поле или самодействие акустических волн в пузырьковой жидкости - это сильно нелинейный эффект, обусловленный своим существованием двустороннему взаимодействию пузырьков и акустического поля. Осциллирующие градиент давления и объем пузырьков приводят к осредненной силе, действующей на пузырьки (сила Бьеркнеса), которая вызывает дрейф пузырьков в более медленном масштабе времени, чем период акустического поля. В свою очередь, поскольку пузырьки играют важнейшую роль в дисперсии и диссипации звука, их миграция вызывает изменение поля. Разработана математическая модель явления и предварительные расчеты предсказывают существование волн акустической самоиндуцированной прозрачности, что также подтверждено экспериментально. Ранее был разработан код на основе метода частиц в ячейках для отслеживания всех пузырьков в системе, было найдено хорошее согласование теории и эксперимента.

Однако этот метод имеет недостаток, связанный с процедурой осреднения, когда число частиц в ячейке достаточно мало. В настоящем исследовании эта проблема была решена решением данной задачи методом граничных элементов. Решение задачи позволяет вычислить силы акустического излучения (силы Бьеркнеса) на каждом пузырьке и, следовательно, смоделировать динамику системы  $N$  тел. Еще одно преимущество МГЭ является его способность решить проблему в областях сложной формы, которая имеет практическое значение для проектирования экспериментальных установок и более реалистичного моделирования.

В настоящем исследовании была разработана пилотная версия кода МГЭ. Результаты были сопоставлены с результатами, полученными ранее другим методом, получено удовлетворительное согласование.

# Особенности динамики детонационных волн в неоднородной пузырьковой жидкости

Гималтдинов И.К., Левина Т.М.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Распространение детонационных волн в пузырьковых средах является уникальным физическим явлением, во-первых, удельно-массовая калорийность пузырьковой жидкости на шесть и более порядков ниже, чем обычных твердых, жидких и газообразных взрывчатых веществ (ВВ), во-вторых, с увеличением объемного содержания взрывчатого газа, т.е. с увеличением калорийности пузырьковой смеси, происходит уменьшение скорости детонационной волны, что не свойственно детонационному процессу для обычных ВВ. Параметры волн детонации не зависят от способа инициирования, а определяются только свойствами среды. Распространение волн в пузырьковой системе является диссипативным процессом, но энергетические потери волны детонации компенсируются химической энергией, содержащейся в пузырьковой среде.

Одномерные детонационные волны в пузырьковых системах достаточно подробно изучены как экспериментально так и теоретически. На данный момент активно ведутся исследования по изучению динамики двумерных нелинейных и детонационных волн.

Системы «инертная жидкость + пузырьки взрывчатого газа» (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) называются системами I типа, пузырьковая смесь «взрывчатая жидкость + пузырьки окислителя» (минеральное вакуумное масло ВМ-3 с пузырьками кислорода) названы системой II типа.

Целью настоящей работы является изучение волнового движения в неоднородной пузырьковой жидкости II типа, неоднородность обусловлена тем, что область расчета поделена на две зоны, в первой зоне жидкость является вакуумным маслом – ВМЗ, а во-второй водоглицериновым раствором. Построена карта возможных ситуаций возникновения взрыва на границе между областями. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных.

---

Работа поддержана грантом РФФИ №16-01-00432

# Распространение линейных волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем

Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Исследуются в линейном приближении закономерности распространения волн давления в цилиндрической полости в пористой среде с гидратосодержащим слоем.

Получены дисперсионные соотношения для основной акустической моды в цилиндрической полости в каждом слое, составляющем пористую среду. На основе данных соотношений рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения волн через границы слоев. Изучено влияние свойств пород, частоты сигнала и протяженности гидратосодержащего слоя на суммарный коэффициент отражения от слоя.

Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации скважинных данных для уточнения положения границ слоев, пересекаемых скважиной, в частности, гидратосодержащего слоя.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (Грант НШ-6987.2016.1).

# Возбуждение деформационных колебаний пузырька акустической волной при резонансе

Губайдуллин А.А.<sup>1</sup>, Губкин А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет

Рассмотрены вынужденные нелинейные колебания газового пузырька в вязкой жидкости в поле акустической волны с учетом диссипации из-за межфазного теплообмена. Выполнено прямое численное моделирование процесса. Показано, что продолжительное периодическое воздействие малой амплитуды в условиях резонанса может привести к перекачке энергии радиальных колебаний газового пузыря в деформационные колебания его поверхности. При этом амплитуда деформационной моды может достигнуть значений, достаточных для разрушения пузырька.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (Грант НШ-6987.2016.1).

# Динамика и акустика полидисперсных газокапельных и пузырьковых сред. Теория и эксперимент

Губайдуллин Д.А.

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований волновой динамики и акустики газокапельных и пузырьковых сред.

Исследовано распространения слабых волн в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых средах с фазовыми превращениями. Разработаны математические модели, получены дисперсионные соотношения, изучены высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий. Показано хорошее согласие представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Экспериментально изучены нелинейные колебания газовзвесей и динамика частиц в трубах в ударно- и безударно, а также в переходном волновом режимах. Показан резонансный характер осаждения капель от частоты колебаний и возможность эффективного акустического осаждения наиболее проблемных субмикронных капель.

На основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье выполнен расчет искажения акустического сигнала при диагностике многослойного образца, содержащего слой жидкости с полидисперсными пузырьками. Получено хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных.

---

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

# Расчет взаимодействия высокоскоростной струи со стенкой

Гусева Т.С.

ИММ КазНЦ РАН

Реализованы алгоритмы и программы для численного моделирования волнового воздействия схлопывающегося сильно несферического пузырька на твердую стенку. Применяется метод SIP-CUP без явного выделения межфазной границы и адаптивная soroban-сетка. Рассматривается случай с образованием на поверхности пузырька тонкой по сравнению с размерами пузырька высокоскоростной струи жидкости, пробивающей сквозь пузырек в направлении стенки. Предполагается, что пузырек несколько удален от стенки, так что его противоположная сторона, по которой приходится удар, моделируется плоским слоем жидкости на стенке. Скорость струи варьируется в диапазоне 150–350 м/с, толщина слоя жидкости на стенке не превышает десятых долей радиуса струи.

---

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 17-11-01135).

# **Численное моделирование и анализ промысловых данных нагнетательных тестов при гидравлическом разрыве пласта**

**Давлетбаев А.Я.**

ООО «РН-УфаНИПИнефть»

В работе представлена математическая модель, которая позволяет описать распределение давления, раскрытия трещины и др. в системе «техногенная трещина-низкопроницаемый продуктивный пласт». Магистральная трещина гидроразрыва пласта (ГРП) изменяет свою геометрию (раскрытие, длину) при нагнетательных тестах с закачкой жидкости в скважину при давлениях выше минимального горизонтального напряжения. Полагается, что высота техногенной трещины равна высоте продуктивного пласта, не меняется во времени. Сечение трещины имеет эллиптическое сечение, т.е. рассматривается модель (РКН) Перкинса-Керна-Нордгрена. В работе рассматриваются и анализируются примеры промысловых нагнетательных тестов при ГРП в низко- и сверхнизкопроницаемых коллекторах.



# Взаимодействие слабонесферических газовых пузырьков в жидкости в трехмерной постановке задачи

Давлетшин А.И.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Рассматривается гидродинамическое взаимодействие слабонесферических газовых пузырьков в жидкости в акустическом поле в трехмерной постановке задачи. Для описания совместной динамики пузырьков используется полученная методом сферических функций система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно радиусов пузырьков, радиус-векторов их центров и векторов, характеризующих отклонение поверхности пузырьков от сферической. Учитывается влияние поверхностного натяжения, вязкости и сжимаемости жидкости. Газ в пузырьках принимается однородным, с давлением, изменяющимся по адиабатическому закону. Приводится ряд результатов расчета, иллюстрирующих влияние трехмерного гидродинамического взаимодействия на поступательное движение и малые деформации пузырьков.

---

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 17-11-01135).

# Структурная поддержка функционирования распределенного коллектива роботов

Даринцев О.В.

Институт механики им. Р.Р. мавлютова УНЦ РАН

Высокими эффективностью и надежностью отличаются способы решения задач, базирующиеся на использовании коллективов (групп) роботов. Для проявления новых функциональных возможностей коллектива необходимо не только увеличить количество агентов, но и разработать такую среду «жизнедеятельности», которая бы на аппаратно-программном уровне поддерживала такой коллектив.

Решение данной проблемы видится в широком использовании методов искусственного интеллекта и облачных технологий, которые изначально строятся на базовых технологиях распределенных вычислений и обладают развитыми средствами диспетчеризации потоков, контроля исполнения и механизмами разрешения конфликтов.

В докладе раскрывается архитектура (структура) системы управления коллективом роботов, учитывающая специфические особенности области применения, решаемых задач и используемых методик, а также рассматриваются способы делегирования полномочий отдельным агентам (роботам), распределения информационных потоков и устранения коллизий. Показано влияние выбранных аппаратно-программных решений на конечную реализацию выбранной структуры.

# Декомпозиция задач в группе роботов с использованием технологий облачных вычислений

Даринцев О.В., Мигранов А.Б.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Создание интеллектуальных роботов определяет высокие требования к быстродействию бортовых систем управления, которые в реальных условиях эксплуатации ограничены. Поэтому является актуальным использование высокопроизводительных вычислительных ресурсов, выделяемых в облаке и эффективно разделяемых между отдельными членами группы. Важную роль в повышении производительности вычислительной системы имеет декомпозиция общей задачи, поставленной перед группой роботов. В процессе декомпозиции решение одной большой задачи разбивается на решение серии меньших, более простых задач. Выделим три способа программирования алгоритмов, которые позволяют провести декомпозицию задач, получаемых из системы управления, для их распределения в приложениях виртуальной машины:

- линейное распределение;
- роевое взаимодействие;
- синтез решений.

В зависимости от поставленной перед группой роботов общей задачи и функциональных возможностей отдельных роботов производится выбор одного из способов декомпозиции. На следующем уровне системы управления используются эффективные методы распределения ресурсов вычислительной системы для их оптимального использования с учетом выбранной модели декомпозиции.

# Метод определения флексоэлектрических коэффициентов нематического жидкого кристалла

Делев В.А.

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) под действием внешнего электрического поля демонстрируют большое разнообразие структурных превращений. В зависимости от анизотропии вязкоупругих свойств и исходной ориентации молекул относительно электрического поля могут наблюдаться как равновесные (флексоэлектрические домены), так и диссипативные (электроконвективные) структуры. Для численных оценок пороговых характеристик наблюдаемых структур необходимо знание всех материальных параметров НЖК. Однако даже для самого исследуемого в настоящее время НЖК 4-п-метоксибензильден-п-бутиланилин (МББА) определение флексоэлектрических коэффициентов остается сложной экспериментальной задачей. Данные, полученные различными методами по измерению этих коэффициентов значительно расходятся не только по величине, но и по их знаку. По этой причине, например, флексоэлектрический эффект обычно пренебрегался в теоретическом анализе электроконвекции в НЖК. В данной работе предложен полуэмпирический метод определения флексоэлектрических коэффициентов НЖК МББА.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №15-02-09366.

# Некоторые задачи движения многофазных сред в «холодной части» газовой части тракта газотурбинного двигателя

Еникеев Г.Г., Яныбаев Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Газотурбинный двигатель, эксплуатирующийся в запыленной атмосфере и морской среде, подвержен негативному воздействию посторонних частиц, попадающих вместе с воздухом в проточную часть. Происходит эрозионный износ лопаток компрессора, коррозия проточной части, ухудшение характеристик двигателя. Причем механизм ухудшения характеристик двигателя различен и зависит от параметров многофазного потока в проточной части. Так при эксплуатации двигателя в запыленной атмосфере может происходить эрозия лопаток компрессора или отложения мелких частиц пыли в совокупности с частицами различных веществ, находящихся в воздухе. Эксплуатация в морских условиях, сопровождается отложением солей на поверхности лопаток и интенсивной коррозией материалов проточной части.

Сложный процесс движения многофазной среды в воздухозаборном устройстве и межлопаточных каналах компрессора сопровождается различными физическими проявлениями: ударом частиц о поверхность, уносом материала поверхности, образованием пленки, испарением пленки и образованием нароста соли, испарением капель и т.д. Процесс движения многофазной среды происходит при изменяющихся параметрах как несущей среды, так и самих частиц. Несмотря на небольшие концентрации частиц в воздухе, при длительной эксплуатации двигателя, наблюдается существенное изменение характеристик, которые приводят к предельному состоянию параметров и невозможности дальнейшей эксплуатации.

Сформулированы и решены некоторые задачи движения многофазной среды в проточной части двигателя, которые позволяют получить качественные и количественные изменения характеристик компрессора и наметить пути их стабилизации. Для решения поставленных задач разработаны математические модели и получены численные решения. Для отдельных процессов проведен физический эксперимент, результаты которого использованы в математических моделях.

# Экспериментальное определение влияния физических особенностей адиабатического прессования дисперсных полимерных композиций на размерно-геометрические параметры прессовок

Жилин С.Г., Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А.

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Решение проблемы формирования конечных размеров литого металлоизделия при исключении из технологической цепи, или минимизации стадии механической обработки заготовок становится возможным в результате использования специальных технологий литья. Одним из традиционных этапов литья по выплавляемым моделям является получение полимерной модели отливки заливкой жидкой или запрессовкой пастообразной модельной композиции в пресс-форму. Механизм структурообразования и формирования конечных размеров таких изделий в значительной степени определяется теплофизическими особенностями применяемых полимерных композиций. Затвердевание полимера сопровождается появлением усадочных дефектов, снижением размерно-геометрической точности и, как следствие, необходимостью применения механических методов исправления дефектов. Альтернативный вариант получения полимерной выплавляемой модели, предлагаемый в настоящей работе, заключается в прессовании дисперсной композиции, при котором возможно достижение ряда технологических преимуществ, стабильного напряженно-деформированного состояния выплавляемой модели, отсутствие усадочных дефектов. Снижение упругого отклика материала прессовки, появляющегося в ряде случаев, вызывает определенную сложность. В результате серии экспериментов исследованы режимы формирования прессовок, при которых достигается минимизация упругого возврата уплотняемого материала, определяющая актуальность проведенных исследований. Регулируемыми параметрами в эксперименте являлись гранулометрический состав полимерной композиции и скорость подачи материала в зону уплотнения. На основании полученных данных проведено построение зависимостей деформации материала от прилагаемой нагрузки, температуры разогрева материала от напряжения, возникающего в последнем в результате уплотнения, а также отклонения размеров прессовки от размеров профильной части пресс-формы при различных скоростях подачи материала в зону уплотнения.

# **Теоретические и практические вопросы обоснования достоверности результатов вычислений**

**Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А.**

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Рассматриваются вопросы, связанные с проблематичностью использования теоретического обоснования результатов применения численных методов, связанной с ограниченностью ресурсов реального вычислительного устройства и наличием различных погрешностей связанных с этим.

Для оценки погрешностей и обоснования их достоверности предлагается использовать эвристические методы и приемы (фильтрацию, визуализацию сравнение результатов оценок и т.д.), позволяющие обнаружить и оценить эти погрешности. Указаны пути повышения надежности оценок.

Показано, что с помощью указанных приемов обнаруживается некачественность результатов вычисления в отличие от подходов, их не использующих.

# Использование АСМ для картирования упругих свойств композиционных материалов на микро- и наномасштабах

Замула Ю.С.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,  
Башкирский государственный университет

Атомно-силовая микроскопия (АСМ), основанная на измерении силы взаимодействия острия зонда с поверхностью исследуемого образца, может быть естественным образом использована для исследования механических свойств материалов на микро и нано масштабах. Одна из используемых для этого методик связана с применением АСМ в режиме модуляции силы (Force Modulation Mode — FMM). В данном режиме осциллирующий с частотой  $20 \div 100$  кГц зонд движется вдоль исследуемой поверхности, находясь с ней в постоянном контакте. При таком сканировании амплитуда ( $A_{FMM}$ ) и фаза ( $\varphi_{FMM}$ ) осцилляций зонда определяются упругими свойствами поверхности образца в области контакта [Agilent 5500 SPM User's Guide. 2008. P.232].

Было проведено исследование поверхности композиционного материала — стеклопластика, состоящего из армирующего стекловолокна и связующего эпоксидного полимера. Построены карты упругих свойств образцов с высоким пространственным разрешением. Кроме этого, были сделаны оценки упругих свойств интерфейса между волокном и полимером, играющего важную роль в обеспечении прочности композитного изделия.

---

Работа выполнена при поддержке Партнерской Программы Скол-тех.



# Численное моделирование динамики межфазной границы методом граничных элементов

Зарафутдинов И.А.<sup>1</sup>, Питюк Ю.А.<sup>1</sup>, Абрамова О.А.<sup>1</sup>,  
Гумеров Н.А.<sup>1,2</sup>, Ахатов И.Ш.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Башкирский Государственный Университет

<sup>2</sup> Institute for Advanced Computer Studies University of Maryland

<sup>3</sup> Центр Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам

Композиционные материалы играют важную роль в авиастроении, автомобилестроении, ракетно-космической технике для решения задач облегчения конструкций при сохранении прочностных характеристик. Одним из наиболее часто используемых методов изготовления композиционных материалов является пропитка сухого текстиля вязкой связующей жидкостью, в процессе которой смола течет в сложной системе каналов, образованной текстильными волокнами.

В работе рассматривается задача о течении ньютоновской жидкости со свободной границей (фронтом течения) в средах идеальной геометрии. Разработан и протестирован алгоритм моделирования движения свободной границы раздела «жидкость-газ» в канале на основе трехмерного метода граничных элементов для течений Стокса. Проведены демонстрационные расчеты динамики фронта вытеснения газа жидкостью в цилиндрическом канале, а также в межканальном пространстве (в канале кольцевого поперечного сечения), моделирующем пространство вокруг волокон текстиля армирующей ткани композитного материала. Представленные результаты многопараметрического анализа динамики межфазной границы показали, что выбор параметров жидкости, текстильных волокон, которые определяют равновесный контактный угол, а также параметров течения является важным фактором для понимания технологических процессов, происходящих при пропитке армирующей структуры композитного материала.

Разработанный подход может быть использован как основа для решения задач, связанных с изготовлением композитных материалов, по исследованию особенностей образования пустот, прогнозированию их объемной доли, размера и формы.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Центра Сколтеха по проектированию, производственным технологиям и материалам, гранта РФФИ № 16-31-00029, гранта Президента РФ МК-3503.2017.8.

# Колебания трубопровода под действием внутреннего ударного давления в жидкости

Зарипов Д.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается изгиб пролета горизонтального трубопровода на двух опорах под воздействием ударного давления во внутренней жидкости с учетом влияния продольной силы на изгиб. Предполагается, что трубопровод испытывает только упругие деформации, расстояние между опорами  $L$  на порядок больше радиуса трубопровода  $R$ , который на порядок больше толщины стенки  $h$ . Принимается также, что при изгибе поперечное сечение сохраняет круговую форму, остается плоским и перпендикулярным к изогнутой осевой линии. Влияние течения жидкости в трубопроводе не учитывается. Жидкость принимается идеальной и несжимаемой, поэтому давление в жидкости по длине трубопровода устанавливается мгновенно и состоит из постоянной и переменной частей  $p = p_0 + p(t)$  ( $t$  – время).

Решение нелинейного уравнения задачи получено численным методом. Произведен сравнительный анализ динамической реакции и напряженно-деформированного состояния трубопровода при действии внутренней ударной волны в линейной и нелинейной постановках.

Показано, что в нелинейном случае возникает колебательный режим движения трубопровода, в отличие от линейного случая, когда происходит экспоненциальный рост амплитуды прогиба трубопровода. Учет влияния нелинейной продольной силы приводит к уменьшению амплитуды и увеличению частоты. Установлено, что при увеличении внутреннего давления происходит рост амплитуды и частоты колебаний.

# Применение многомасштабных методов при моделировании процессов разработки месторождений с трещиновато-пористым коллектором

Зеленин Д.В., Пятков А.А.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им.  
С.А. Христиановича СО РАН

Моделирование разработки нефтяного месторождения с трещиновато-пористым коллектором требует больших временных и вычислительных ресурсов. Трещины обладают малым относительным поровым объемом и высокой абсолютной проницаемостью, что накладывает ограничение на выбор расчетного шага по времени. Для более точного описания процессов фильтрации жидкости в трещиновато-пористом коллекторе необходимо строить подробную гидродинамическую модель месторождения. Характерное число расчетных блоков в данном случае может составить порядок 105–106. Что также приводит к большим временным затратам при вычислении. Для решения данной проблемы предлагается применение многомасштабных методов: по времени, для расчета фильтрации внутри трещины и по пространству, для расчета фильтрации в поровой матрице.

Суть многомасштабного метода по времени заключается в том, что область с повышенной проводимостью (трещина/двойная среда) между блоками рассчитывается отдельно с меньшим шагом по времени, когда основная поровая матрица считается с оптимальным временным шагом. При решении задачи фильтрации рассчитываются поля давления и водонасыщенности на подробной гидродинамической модели, состоящей из большого количества расчетных блоков. Многомасштабный метод по пространству позволяет получить дополнительное ускорение за счет использования крупномасштабной сетки для вычисления поля давления.

Представленные многомасштабные методы являются довольно эффективными для увеличения скорости расчета. В то же самое время они сохраняют прогнозную способность модели, что позволяет использовать их как в академических, так и в промышленных целях.

# Численное исследование течения двухфазной жидкости в микроканалах

Игошин Д.Е.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им.  
С.А. Христиановича СО РАН

Рассмотрено двухфазное течение жидкости через пористую среду, образованную микроканалами. Способ определения относительных фазовых проницаемостей в такой среде состоит в следующем. На входе и выходе канала поставим периодическое граничное условие, позволяющее проводить расчеты в объеме одной поры. Решая численно систему уравнений Навье–Стокса, находим расходы фаз через поперечное сечение рассматриваемого объема. Сопоставляя найденные массовые расходы с расходами, полученными для однофазных течений получаем относительные фазовые проницаемости каждой фазы.

# Моделирование течения в трубопроводе с учетом теплообмена с окружающей средой

Ишимбаев М.В., Мусин А.А.

Башкирский государственный университет

Одним из недостатков транспортировки флюидов с помощью системы трубопроводов является слабость контроля термодинамических параметров. Это может привести как к снижению скорости транспортировки, так и к серьезным поломкам в самой системе. Рассмотрим пример критичного изменения одного параметра флюида: при транспортировке сырой нефти уменьшение температуры может привести к оседанию более тяжелой фракции на стенки труб, что уменьшает эффективный радиус течения и, как следствие, уменьшает эффективность системы. Одно из решений проблем – использование пунктов подогрева на всей длине нефтепровода.

В данной работе моделируется неизотермическое течение подогретого флюида в цилиндрической трубе с учетом теплообмена с окружающей средой.

# Влияние дисперсного состояния продукции скважин на выбор нефтегазопромыслового оборудования

Ишмурзин А.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Продукция нефтяных и газовых скважин представляет собой многофазную многокомпонентную дисперсную систему со свойствами, приобретенными благодаря наличию границы раздела между компонентами и суммарной площади этого раздела. В составе продукции нефтяных и газовых скважин присутствуют гетероэлементы, значительно влияющие на их физические свойства. Это, прежде всего, капельная вода, крупнодисперсные и мелкодисперсные механические примеси, высокомолекулярные парафины, церезины, смолисто-асфальтеновые вещества, соли, редкоземельные металлические гетероэлементы.

Более важным является дисперсное состояние присутствующих элементов, определяющее агрегатное и кинетические свойства продукции, в итоге – выбор технологии добычи и подготовки продукции нефтяных и газовых скважин. Следовательно, оборудование, используемое в добыче и подготовке этой продукции, должно проектироваться с учетом приобретенных свойств в зависимости от количества, состава и дисперсного состояния присутствующих элементов.

Вязкость продукции обуславливает не просто наличие капельной воды, а ее дисперсное состояние, в соответствии с которой подбирается оборудование для добычи, транспортировки и подготовки этой продукции. Содержание механических примесей в продукции устанавливает жесткие требования к износостойкости проточной части насосов. Выбор сепарационного оборудования, а также способа и состава оборудования подготовки нефти исключительно исходит из свойств продукции, обусловленных наличием гетерогенных и гомогенных составляющих. В связи с такой постановкой задачи здесь представлены общие сведения о дисперсных системах, определяющие конструктивные особенности нефтегазового оборудования.

# **Повышение фильтрационных характеристик породы в призабойной зоне нефтяных скважин**

**Ишмурзина Н.М.**

Башкирский государственный университет

Одной из составляющих в решении проблемы повышения эффективности добычи нефти штанговыми насосами является необходимость постоянного выноса из забоя всех компонентов добываемой продукции, поступающей к забою скважины из пласта. С целью очистки забоя от накоплений воды и мехпримесей, а также предупреждения их накопления в каком-либо интервале подъемника, создана и широко апробирована в промысловых условиях новая технология подъема нефти с забоя скважины с учетом многокомпонентности и многофазности добываемой продукции, которая предусматривает выравнивание индивидуальных скоростей составляющих ее компонентов. В результате технология повышает добычу по нефти, снижает обводненность продукции, улучшает фильтрационные параметры призабойной зоны.

# Прогнозирование нетрадиционных коллекторов на основе динамического анализа

Ишмурзина Н.М., Абдульменова Л.Т.

Башкирский государственный университет

Сейсмическая инверсия - технология, позволяющая с применением физических и математически обоснованных алгоритмов использовать сейсмические данные для прогноза объемного распределения различных петрофизических параметров продуктивных пластов в межскважинном пространстве. Также применение геостатистического моделирования, основанное на скважинных данных и априорных представлениях о седиментационной модели резервуара.

Прогнозирование коллекторов на основе динамического анализа состоит из следующих этапов.

1. Приведение сейсмических и скважинных данных к единому временному масштабу.
2. Сейсмическая инверсия - решение обратной динамической задачи сеймики, то есть восстановление распределения упругих параметров геологической среды по зарегистрированному волновому полю.
3. Изучение упругих свойств и разделение целевых пластов на литотипы, выделение интересующих продуктивных зон, установление зависимостей между акустическими и фильтрационно-емкостными свойствами.



# Подбор скважин-кандидатов для ГРП с учетом типа коллектора

**Ишмурзина Н.М., Баранов Г.А.**

Башкирский государственный университет

При моделировании процесса гидроразрыва пласта и создании дизайна учитываются многие факторы, в первую очередь, геологические: тип коллектора, механические свойства, фильтрационные свойства, эффективная мощность, количество глинистых пропластков и их градиенты давления, пластовое давление, температура, глубина залегания. Одновременно также подробно анализируются параметры соседних скважин, находящихся на том же кусту. Такой подход к подбору скважин-кандидатов на ГРП позволяет повысить конечную эффективность метода. В работе приведены результаты проведения ГРП на реальных скважинах.

# Стационарная скорость волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации

Кабиров М.М.<sup>1</sup>, Садриддинов П.Б.<sup>2</sup>,  
Гулбоев Б.Дж.<sup>1</sup>, Холов О.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российско-Таджикский (славянский) университет

<sup>2</sup> Институт математики им. А.Джураева АН Республики Таджикистан

<sup>3</sup> Дангаринский государственный университет

Рассматривается однотемпературная математическая модель распространения стационарной волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры среды и концентрации недостающего компонента. Получены связь между функциями температуры и концентрации, а также уравнение для численного расчета распределения температуры. Численные расчеты проведены для разных составов водородо-воздушной смеси газов и выяснены их влияния на характеристики волны. Изучены зависимости скорости волны, равновесной температуры, характерного размера зоны горения и коэффициента диффузии недостающего компонента от скорости вдува газа.

# Исследование кристаллообразования карбоната кальция в водном растворе солей

Карпей Т.В.

Башкирский государственный университет

Одним из самых распространенных видов осложнений при эксплуатации нефтяных скважин является солеотложение на скважинном оборудовании [Канзафаров Ф.Я. и др. Влияние солеотложения на процесс коррозии эксплуатационных колонн добывающих скважин // Вестник ЦКР Роснедра. 2013. №. 1]. Выпадение неорганических солей приводит к увеличению числу аварийного ремонта скважин, простоев скважин, уменьшению дебита нефти, удорожанию себестоимости нефти. Среди неорганических солей можно выделить такие соли, как карбонат кальция, магния, сульфат кальция, бария, кальция, хлорид натрия, встречающиеся во многих нефтедобывающих регионах Российской Федерации: Западная Сибирь, Башкирия, республика Татарстан, Пермь, Оренбург [Исаева Г.Ю. Разработка методики и модели компьютерного прогнозирования процесса солеотложения в нефтяных пластах при заводнении // Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.06. Москва, 2000. 163 с.].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование динамики образования кристаллов карбоната кальция при смешивании водных растворов солей хлорида кальция ХЧ и карбоната натрия ХЧ при разных температурах. Кристаллы карбоната кальция образовывались в каналах микрофлюидного устройства – генератора капель, который был изготовлен с помощью метода мягкой литографии. Отдельные капли, которые содержали водный раствор солей, разделялись силиконовым маслом ПМС-5 (Solins). Для визуализации, анализа роста кристаллов использовались видеочамера и микроскоп.

Получены экспериментальные данные в виде видеозаписей процесса, графиков роста кристаллов в зависимости от температуры. Установлено и визуализировано увеличение количества и размеров кристаллов с повышением температуры.

# О возможном механизме Hammer-эффекта при проведении операции гидроразрыва пласта

Кашапов Д.В.<sup>1</sup>, Байков В.А.<sup>1</sup>,  
Топольников А.С.<sup>1</sup>, Урманчиев С.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «РН-УфаНИПИнефть»

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматриваются динамические процессы сопровождающие остановку при закачке жидкости ГРП в системе скважина-пласт. Возникающие колебания давления на устье и забое получили название Hammer-эффект. Исследованы закономерности поведения колебаний при различных свойствах закачиваемой жидкости и различных режимах закачки. Показано, что главной причиной различия в амплитудах колебаний давлений на устье и забое является газосодержание в жидкости, и его распределение по глубине. Решение задачи осуществлено численным методом – методом контрольного объема. Результаты сопоставлены с экспериментом.

# Исследование влияния течения окружающей воды на затопленную многофазную струю

Кильдибаева С.Р.

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

В работе рассматривается течение многофазной затопленной струи, распространяющейся в условиях стабильного существования гидрата. В начальный момент времени известны: радиус скважины, из которой поступает смесь нефти и газа, температура и объемные расходы компонент смеси, температура и скорость течения окружающей воды. Под действием поперечного течения окружающей воды, траектория струи может искривляться, из-за чего пузырьки газа могут покинуть струю. Примем, что газ распространяется в виде пузырьков, а сами пузырьки газа занимают центрально ядро струи.

В основе математической модели лежит интегральный Лагранжевый метод контрольного объема (ИЛМКО). Согласно этому методу струя состоит из последовательных элементов – цилиндров, характеризующихся высотой, радиусом и пространственными координатами. Каждый элемент – контрольный объем (КО) характеризуется своим расположением в пространстве, средней скоростью, температурой, плотностью, концентрацией веществ, из которых состоит струю. Турбулентное вовлечение окружающей жидкости в КО вычисляется на каждом шаге по времени. Задача состоит в том, чтобы определить все характеристики КО с течением времени. Зная характеристики КО с течением времени, можно смоделировать струю в целом.

С учетом того, что струю распространяется в условиях стабильного существования гидрата, будем также учитывать процесс формирования гидратных оболочек на поверхности пузырьков метана. В работе также рассмотрено влияние скорости окружающей воды и коэффициента вовлечения окружающей воды на температуру и интенсивность гидратообразования.

# **Исследования процессов солеотложения на элементах погружного нефтедобывающего оборудования при электромагнитном воздействии**

**Ковалёва Л.А., Киреев В.Н., Зиннатуллин Р.Р.,  
Ишмурзина Н.М., Бадикова А. Д., Мухтаров И.А.**

Башкирский государственный университет

Актуальным на сегодняшний день вопросом повышения эффективности добычи углеводородов, является вопрос о борьбе с солеотложением на погружном оборудовании при эксплуатации скважин. Солеотложение катализирует износ глубиннонасосного оборудования, приводит к не запланированным тратам на ремонт скважин, разбор и чистку аппаратуры. Всё это в совокупности значительно ухудшает экономические показатели работы нефтегазодобывающих предприятий.

Одним из решений данной проблемы, не требующей больших затрат, является обработка флюида электромагнитным полем. Способ этот уже применяется, но лишь частично, так как до конца механизм воздействия электромагнитного излучения ещё не изучен.

Данная проблема заставляет комплексно подходить к её решению. Необходимо знание физико-химических процессов, протекающих в скважине, при электромагнитном воздействии, связанных с солеотложением, знание причин солеотложения и факторов, способствующих ему. Основным направлением борьбы с солеотложением должно стать их предупреждение, как постоянно действующая мера, что требует системного подхода.

Для подробного изучения влияния электромагнитного поля на процессы солеотложения был собран лабораторный стенд, который предусматривал обработку раствора соленой воды электромагнитным полем и отложение солей в свидетеле при заданной температуре. Анализировались образцы раствора до и после обработки электромагнитным полем, а также образцы выпавших осадков. Были проведены испытания нескольких видов излучателей и по результатам анализов были определены наиболее эффективные.

# Особенности гравитационной конвекции магнитного коллоида в горизонтальном слое. Эксперимент

Колчанов Н.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет

В работе экспериментально исследуется гравитационная конвекция магнитного коллоида в горизонтальном слое. В качестве магнитного коллоида используются магнитные жидкости, изготовленные на основе керосина и ундекана. Магнитные частицы из магнетита, благодаря которым коллоид приобретает магнитные свойства, имеют средний размер 9–10 нм. Чтобы предотвратить слипание частиц между собой, их поверхность покрыта монослоем молекул поверхностно-активного вещества — олеиновой кислоты.

Горизонтальный слой моделируется при помощи цилиндрической полости с диаметром 58 мм и высотой 2.4 мм. Для возбуждения конвекции снизу слой подогревался, а сверху охлаждался. С целью определить порог устойчивости механического равновесия и визуализировать конвективные структуры в экспериментах использовались два вида измерений одновременно: термопарные и тепловизионные.

По результатам проделанных в исследовании измерений можно сделать вывод, что конвективное поведение магнитного коллоида сильно отличается от поведения однофазных молекулярных сред. Например, в простой однокомпонентной жидкости после порога устойчивости механического равновесия возникают стационарные режимы конвекции, в то время как в магнитной жидкости характер режимов нестационарный. Это различие можно объяснить наличием у двухфазной магнитной жидкости дополнительных термодиффузионных и седиментационных свойств. В данном эксперименте были зафиксированы два вида режимов, один из которых наблюдался впервые. Наличие этого режима можно объяснить, если предположить, что в магнитной жидкости кроме отдельных магнетитовых частиц присутствуют агрегаты, состоящие из десятков частиц и имеющие размеры порядка нескольких сотен нанометров. Благодаря анализу термограмм, полученных с помощью тепловизора с поверхности магнитного коллоида, можно сделать вывод, что размер агрегатов уменьшается с ростом средней температуры магнитного коллоида.

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00040 мол\_а.

# Устойчивость равновесия и режимы конвекции в частично заполненном неоднородной пористой среде слое жидкости при высокочастотных вибрациях

Колчанова Е.А.<sup>1,2,3</sup>, Колчанов Н.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет

Численно моделируется возникновение осредненного течения в подогреваемом снизу горизонтальном слое однокомпонентной жидкости, частично заполненном пористой средой. Пористая среда считается неоднородной в вертикальном направлении и недеформируемой. Слой совершает поперечные поступательные вибрации с высокой частотой. Период вибраций считается малым по сравнению с характерными временами распространения гидродинамических и тепловых возмущений в жидкости.

Задается линейный закон изменения пористости среды с вертикальной координатой. Проницаемость оценивается по формуле Кармана–Козени. Фильтрация жидкости в пористой среде подчиняется закону Дарси. Численное моделирование линейной задачи устойчивости механического равновесия жидкости проводится на основе метода стрельбы. Полная нелинейная задача решается методом конечных разностей.

Показано, что с ростом отношения толщин  $d$  области слоя без пористой среды и области слоя с пористой средой происходит резкая смена характера неустойчивости: с длинноволновой на коротковолновую. Длина волны наиболее опасных возмущений равновесия при этом меняется почти в 10 раз. При малых значениях  $d$  возникает крупномасштабное течение во всем слое. При больших  $d$  конвекция возбуждается преимущественно в области слоя без пористой среды. Жидкость, насыщающая пористую среду, остается практически невозмущенной. Вибрации стабилизируют равновесие и увеличивают длину волны его критических возмущений. При больших интенсивностях вибраций осредненное конвективное течение возбуждается во всем слое. В случае, когда пористость среды убывает с вертикальной координатой, длина волны наиболее опасных возмущений равновесия с ростом вибрационного ускорения увеличивается монотонно. Нали-



чие двух возможных мод конвекции оказывает влияние на характер изменения теплового потока от нижней горячей границы слоя с ростом надкритичности. Если вблизи порога конвекция зарождается, главным образом, в области слоя без пористой среды, то с ростом надкритичности наблюдается скачок теплового потока. Он связан с проникновением течения и его интенсификацией в области слоя с пористой средой при увеличении числа Релея.

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60004 мол\_а\_дк.

# **Влияние начальных возмущений сферической формы кавитационного пузырька на его схлопывание у стенки**

**Косолапова Л.А., Малахов В.Г.**

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Изучается осесимметричное схлопывание несферического кавитационного пузырька в жидкости у твердой стенки. Жидкость идеальная, несжимаемая, ее течение потенциальное. Для отслеживания движения поверхности пузырька и вычисления потенциала скорости на ней используется метод Эйлера в сочетании с методом граничных элементов. Процесс схлопывания пузырька учитывает возможность его превращения в тороидальный. Определяются форма поверхности пузырька, поля скорости и давления в окружающей его жидкости. Исследуется зависимость давления в жидкости и на стенке от начальной формы пузырька и его начального расстояния до стенки.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-01-00433).

# Электро-магнитные свойства пиролизованного КПА (ПКПА)

Косых Л.А.<sup>1</sup>, Заманова Г.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет

Исследования полиенов сейчас как бы не в тренде передовых научных изысканий. Однако если приглядеться к простейшей полисопряженной линейной одномерной цепочке, например полиацетилена, то можно увидеть в этой цепочке, базовый элементарный первокирпичик для строительства и графита, и целого класса углеродных материалов, наконец графена и иже с ним: фуллеренов, графеновых трубок, нанолент и пр. графеновых и нано материалов. Особенно ярко этот кирпичик виден на краях указанных материалов, «срезах нанолент» в виде зиг-заг (zig-zag, аценовый) или кресло (armchair, фенантреновый), а особенно графеновых нанолент. Везде «просвечиваются» цис- и транс- полиацетиленовые мотивы. В этой связи и необычные магнитные проявления ПКПА (КПА — кристаллический полиацетилен) лежат в плоскости новейших изысканий нанозифики.

На начальных стадиях, пиролиз ведет к автоотщеплению водорода в следствии сильного «разогрева» протонов кристаллической решеткой (механизм которого не ясен), благодаря которому автоотщепление водорода начинается уже при температурах  $\sim 2500$  °С. Формирование фазы нескомпенсированного ПА общей формулы  $(\text{CН}_y)_n$   $y < 1$  завершается с повышением температуры отжига до  $\sim 6000$  °С, количество нескомпенсированных магнитных моментов на узлах полиацетиленовой цепочки достигает максимального значения (контролируется временем отжига). Данная фаза, в зависимости от модификации исходного КПА, обладает ферро- или ферримагнитным упорядочением, что было показано методами ЭФР. В случае моноклинной модификации, уже при 600–7000 °С начинается графитизация, что фиксировалось по появлению на рентгенограммах расстояния  $d_{002} = 0,34$  нм, характерного для квазидвумерного графита (расстояния между плоскостями, состоящими из сеток правильных гексагонов, читай — графена). Следует отметить, что размер образующихся кристаллитов равен  $\sim 50$  нм.

Дальнейшая термообработка исходного полимера при температурах до  $\sim 1500$  К ведет к началу формирования плотной блестящая пленки толщиной 10–100 мкм со слоистым строением. Эти твердые углеродные пленки с ограниченной гибкостью и ярким металлическим

блеском (коэффициент отражения при нормальном падении светового пучка составляет  $\sim 30\%$  и слабо зависит от длины волны в интервале 350–370 нм) были получены при термообработке в интервале температур 1500–2800 К. Среднее расстояние между графитоподобными слоями вдоль нормали к плоскости пленки  $d_{002} = 0,349$  нм ( $T = 1500$  К). В процессе последующего отжига межслоевое расстояние  $d$  уменьшается с 0,349 нм до 0,343 нм при  $T = 2800$  К, а степень ориентации графитоподобных слоев сильно возрастает. Таким образом, термическая обработка полиацетилена приводит к формированию больших ( $\sim 100$  нм) азимутально разупорядоченных графитовых сеток, для которых даже при  $T \sim 2800$  К затруднено вращение и образование трехмерно упорядоченной структуры, другими словами, формируются графеновые стопы. Анизотропия структуры полученной пирографитовой пленки проявляется и в электрофизических свойствах. Так, отношение электропроводности параллельной  $\sigma_{\parallel}$  и перпендикулярной  $\sigma_{\perp}$  плоскости  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$  пленки достигает величины  $10^4$ , а сами величины  $\sigma_{\parallel}$ ,  $\sigma_{\perp}$  слабо зависят от температуры измерения в интервале 100–1000 К. В графите  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp} \sim 10^3$  при значении проводимости вдоль двумерных слоев  $\sigma_{\parallel} \sim 0,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Для наших графеновых стоп эта анизотропия еще выше, т.к. для трехмерного графита  $d_{002} = 0,335$  нм, для стопок же  $d_{002} = 0,343$  нм. Это приводит к ослаблению взаимодействия между слоями и уменьшению проводимости в перпендикулярном направлении до  $\sigma_{\perp} \sim 6 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ .

# Исследование вытеснения нефти водой из зонально-неоднородной пористой среды с цилиндрической симметрией

Косяков В.П.<sup>1,2,3</sup>, Мусакаев Э.Н.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
СО РАН

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет

<sup>3</sup> ООО «ЮНИ-КОНКОРД»

Разработка нефтяных месторождений обычно проводится при симметричной расстановке скважин. В качестве примера можно привести семиточечную или девятиточечную схему расстановки, при которых процесс вытеснения приближенно обладает цилиндрической симметрией. Представляет интерес сравнение динамики добычи нефти и коэффициента извлечения нефти (КИН) в двух случаях. Первый случай – когда нагнетательная скважина расположена в центре, а добывающие скважины – по контуру. Во втором случае нагнетательный ряд расположен по контуру, а добывающая скважина – в центре. В первом приближении задачу вытеснения нефти водой из такого зонально-неоднородного пласта можно считать одномерной, при этом зоны отличаются значениями фильтрационно-емкостных свойств, а также значениями толщины и длины.

В настоящей работе на основе аналитических решений [Косяков В.П. Получение точных решений задачи Бакли-Леверетта в зонально-неоднородном пласте / В.П. Косяков, С.П. Родионов // Вестник Тюменского государственного университета. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010. №6. С. 36–42.; Басниев К.С. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, И.Н. Кочина, В.М. Максимов М.: Недра, 1993. 416 с.] выполнено исследование зависимости времен вытеснения нефти из зонально-неоднородного пласта от параметров задачи. Получены точные решения задачи вытеснения нефти водой из зонально-неоднородного пласта, проведен анализ полученных результатов. В частности, при вытеснении нефти водой по схеме Лейбензона-Маскета, из полученного решения следует, что даже в однородной среде разность времён вытеснения нефти водой со стороны скважины и со стороны контура отлична от нуля. Получен результат о том, что первый вариант (нагнетательная скважина находится в центре) более предпочтителен нежели чем второй (добывающая скважина находится в центре).

# Реализация метода исчерпывания для триангуляции двумерных областей

Криони И.Н.<sup>1</sup>, Семенова А.В.<sup>1</sup>, Киреев В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Одним из ключевых этапов при численном решении любой физической задачи является дискретизация расчетной области (построение сетки). От того, насколько качественно построена сетка зависит не только точность получаемого численного решения, но и успех численного моделирования в целом. Построение сеток в двумерных областях произвольной геометрической формы, а также трехмерных областях является сложной и нетривиальной вычислительной задачей. В настоящее время доступно огромное число коммерческих и свободно распространяемых сеточных генераторов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Несмотря на это остается актуальной задача разработки новых реализаций 2D и 3D сеточных генераторов, которые будут строить качественные сетки эффективнее и быстрее существующих аналогов.

В данной работе на основе хорошо известного метода исчерпывания (Advancing Front Technique, AFT) была создана оригинальная компьютерная программа для триангуляции произвольных двумерных областей. Основная идея метода заключается в дискретизации границы расчетной области и последовательном построении треугольных элементов до тех пор, пока вся область не будет «исчерпана». При реализации алгоритма исчерпывания на языке программирования C# особое внимание было уделено вопросам организации структуры данных, а также процедурам оценки корректности вновь построенного треугольника и проверки того, что новый треугольник не пересекается с уже существующими. В результате оптимизации этих процедур, которые вызываются несколько раз на каждой итерации алгоритма, была повышена общая производительность алгоритма.

Тестирование разработанного сеточного генератора на областях различных (в том числе достаточно сложных) геометрических форм показало его работоспособность и удовлетворительное быстродействие. Проведено качественное сравнение построенных сеток с триангуляциями, полученными с использованием распространенных генераторов сеток Gmsh и NETGEN. В дальнейшем планируется использование в алгоритме проверки условия Делоне для получения более качественной триангуляции и оптимизация программного кода с целью увеличения быстродействия.

# Численное моделирование образования колец Лизеганга в одномерном случае

Криони И.Н.<sup>1</sup>, Семенова А.В.<sup>1</sup>,  
Урманчиев С.Ф.<sup>2</sup>, Киреев В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Кольца Лизеганга, представляющие собой периодические структуры (кольца или полосы), были впервые обнаружены немецким химиком Рафаэлем Эдуардом Лизегангом более века назад и до сих пор привлекают внимание ученых различных специальностей: физиков, химиков, биологов, геологов, медиков. В настоящее время еще не создана теория, способная объяснить все механизмы, лежащие в основе таких периодических реакций. Дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение закономерностей образования структур Лизеганга может, в частности, способствовать более глубокому пониманию особенностей осадкообразования в различных технологических процессах нефтехимических производств.

В работе с помощью численного моделирования исследуется образование колец Лизеганга, т.е. процесс периодического осаждения при диффузии двух реагирующих химических веществ. Одномерная математическая модель процесса состоит из трех дифференциальных уравнений диффузии с учетом реакции для концентраций исходных компонент и образующегося осадка. Кинетика образования осадка описывается в соответствии теорией перенасыщения В. Оствальда. Уравнения математической модели решались численно методом контрольного объема с использованием написанного авторами работы на языке C# компьютерного кода.

В результате численного моделирования были получены периодические структуры из образовавшегося осадка, которые качественно соответствуют картинам, наблюдавшимся в экспериментах. Показано, что полученные численно кольца Лизеганга удовлетворяют известным закономерностям: соотношение расстояний до соседних колец остается постоянным и существует степенная зависимость между расстояниями до колец и временем их образования. Также исследовано влияние отношения концентрации исходных веществ на характер образующихся структур.

# Моделирование течений стратифицированной жидкости в области с различным соотношением сторон

Кулешов В.С.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Численно исследуются особенности образования слоистых течений при термо-гравитационной конвекции, слабо стратифицированной неоднородности жидкости в зависимости от соотношения сторон ячейки.

Представлена замкнутая математическая модель, основанная на уравнениях динамики сплошной среды, в предположении линейной зависимости плотности жидкости от температуры и солёности, и записанная в приближении Обербека–Буссинеска. Для расчета поля течения жидкости реализован модифицированный до второго порядка точности по времени вычислительный программный продукт, основанный на неявном методе контрольного объема и алгоритме SIMPLE, с применением многопроцессорных технологий.



# Приближенное восстановление целой функции в задачах Штурма–Лиувилля

Кумушбаев Р.Р.

Башкирский государственный университет

При решении многих прикладных задач математической физики возникают как прямые, так и обратные задачи Штурма–Лиувилля с полиномиальным вхождением параметра в краевых условиях. Обратные задачи состоят в определении потенциала в дифференциальном уравнении или полиномов в краевых условиях. Для идентификации потенциала (и полиномов) в качестве спектральных данных используется несколько спектров, спектральная функция, функция Вейля и т.п. Т.е. спектральные данные содержат в себе гораздо больше информации, чем (один) спектр краевой задачи. В задачах же идентификации только полиномов от спектрального параметра, которые входят в краевые условия, одного спектра, как правило, бывает достаточно. В настоящей работе решается задача отыскания целой функции из краевого условия по ее известным собственным значениям.

# Уточнение модели течения газожидкостной смеси в скважине

Ляпидевский В.Ю.<sup>1</sup>, Тихонов В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

<sup>2</sup> Weatherford

При бурении скважин традиционным методом давление в открытом стволе принято поддерживать выше пластового. Это позволяет предотвратить проникновение газа или жидкости из пласта в скважину. Однако при слишком высоком давлении может произойти разрушение пласта и утечка бурового раствора. Современный метод бурения с управлением давлением в затрубном пространстве на выходе из скважины позволяет избежать проблемы путем поддержания давления в скважине выше пластового давления и давления обрушения (коллапса) породы и ниже давления гидроразрыва. Эффективность бурения за счет использования более легких растворов при этом повышается. Одной из главных задач при бурении таким методом является контроль объема газа, попавшего в скважину из пласта. В этой связи большое значение приобретает математическое моделирование, позволяющее оценить мощность выброса заблаговременно, чтобы успеть приложить противодействие в скважине до выхода газа на поверхность.

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

В качестве уравнения, связывающего скорость подъема газа со скоростью смеси, используется уточненное уравнение для труб большого диаметра ( $>100$  мм) с параметрами, зависящими от объемной фракции газа практически во всем диапазоне ее значений Shi, et al [Shi, H., et al, "Drift-Flux Parameters for Three-Phase Steady-State Flow in Wellbores", SPE Journal, June (2005), 130–137]. В качестве модели газа рассматривается реальный газ, для которого зависимость между плотностью и давлением определяется с помощью Z-фактора. Источниковые члены, характеризующие скорость межфазового перехода в системе «жидкость–газ», детализируются с использованием модели Lund & Aursand [Lund, H., Aursand, P. "Two-Phase Flow of CO<sub>2</sub> with Phasr Transfer", Energy Procedia, 23 (2012), 246–255].

Для повышения эффективности решения исходные уравнения DFM преобразуются, путем введения лагранжевой массовой координаты. Это позволяет ограничить область определения задачи только массой поступившего в скважину газа, несмотря на изменение протяженности загазованной области по мере подъема в скважине. Для численного решение уравнений используется явная схема Годунова. При аппроксимации в граничных точках рассматривается решение линеаризованной задачи о распаде разрыва. Предложенный подход позволил разработать программу, позволяющую оценивать эволюцию загазованной области от точки выброса в многократно ускоренном масштабе времени [Liapidevskii, V.Yu., Tikhonov V.S., “Lagrangian approach to modeling unsteady gas-liquid flow in a well”, *Journal of Physics: Conference Series*, 722 (2016), <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/722/1/012026>.].

Представлены примеры расчета переходных процессов, характеризующих изменение размера загазованной области и скорости ее подъема, а также давления в скважине. Проведена оценка параметров замыкающих соотношений, влияющих на точность модели.

# **Обзор экспериментальных установок по исследованию процессов, протекающих при операциях проведения гидроразрыва пласта**

**Мавлетов М.В.**

ООО «РН-УфаНИПИнефть»

Рассматривается отечественный и зарубежный опыт по экспериментальному исследованию процессов протекающих при операциях проведения гидроразрыва пласта (ГРП). Основной акцент делается на течение жидкостей ГРП в трещинах и щелях. Исследуется корректность применимости результатов экспериментальных исследований к анализу промысловых данных.

# Зависимость перераспределения температуры в вихревой трубе от геометрии завихрителя

Михайленко К.И.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

К настоящему времени из литературы хорошо известен эффект температурной сепарации потока сжимаемого газа в канале вихревой трубы, называемый также эффектом Ранка–Хилша. Рассматриваемый эффект представляет большой теоретический и практический интерес, поэтому существует значительный объём работ, посвящённых различным аспектам исследования и применения вихревых труб.

Для моделирования завихренных потоков в канале трубы Ранка–Хилша решалась математическая модель, описывающая течение невязкого сжимаемого флюида в трёхмерной области. Модель включает в себя уравнение неразрывности, уравнения импульсов без вязкой составляющей, уравнение полной энергии и замыкается уравнением состояния идеального газа. Вычислительное моделирование проводилось в пакете OpenFOAM. Для учёта турбулентных эффектов был использован метод крупных вихрей (LES). Разностная схема для записанных уравнений в рассматриваемом пакете основывается на хорошо известном консервативном методе контрольного объёма. Выбранная последовательность решения уравнений и соответствующие итерации определялись алгоритмом PIMPLE. Особое внимание при моделировании уделялось построению ортогонализированной структурированной вычислительной сетки. Такой подход позволяет снизить вычислительную погрешность и уменьшить количество узлов сетки, то есть ускорить вычислительный процесс.

При уменьшении количества узлов сетки и соблюдении требований ортогонализированности и структурированности радиальный размер завихрителя — подводящих воздух каналов — увеличивается. Таким образом, увеличивается и радиальный размер проекции входящего потока воздуха. Такое изменение входящего потока может приводить к тому, что температура выходящих потоков меняет своё распределение: на дальнем конце происходит отбор газа с температурой меньше исходной, а на ближнем — наоборот, большей.

В настоящий момент неясно, определяется ли описанный эффект обратной температурной сепарации особенностями модели, численного метода или существует на практике. Дальнейшая работа призвана прояснить указанный момент.

# Математическое моделирование неизотермической фильтрации в системе метан-вода

**Моисеев К.В.**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В настоящее время на газовых и газоконденсатных месторождениях наблюдается интенсивное увеличение объемов попутно добываемой воды. Например, на сеноманских установках комплексной подготовки газа Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения годовые объемы добываемой попутной воды составляют почти 100 тыс. куб. м. Более того данные гидродинамических исследований скважин показывают, что выносится в основном конденсационная вода, объемы которой в 6–7 раз превышают объемы пластовой воды.

Влагосодержание природного газа, как правило, невелико, но учитывая объемы добываемого газа, общий объем конденсационной воды составляет значительную величину. Поэтому задача прогнозирования добычи конденсационной воды считается актуальной и практически значимой. А расчет фазовых превращений в системе метан-вода позволит усовершенствовать существующие термогидродинамические представления о происходящих в пласте процессах.

В работе численно решается система уравнений линейной неизотермической фильтрации двухкомпонентной системы метан-вода в случае радиальной симметрии. Фазовые равновесия рассчитываются исходя из уравнения состояния Пенга–Робинсона.

# Влияние вакуумирования формы на образование пустот при изготовлении композитов методом жидкого формования

Муллаянов А.И.

Башкирский государственный университет, Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем

Область применения волокнистых полимерных композитов в качестве конструкционных элементов неуклонно растет. Один из наиболее широко применяемых методов изготовления таких материалов основан на пропитке смолой жесткой формы, содержащей волокнистый армирующий наполнитель, с последующим отверждением смолы и освобождением детали из формы. Армирующая структура имеет сложную пористую структуру, вследствие чего, при затекании смолы могут образовываться пустоты и зоны «непропитки». Это является существенной проблемой при изготовлении композитов, так как, пустоты значительно ухудшают механические свойства конечной детали.

В работе сделана оценка объемного содержания пор в образцах композитных материалов, изготовленных методом литьевого формования. Для изготовления образцов использовалась прозрачная форма из акрилового стекла, позволяющая регистрировать положение фронта связующего при заполнении формы. Оценка концентрации пор в образцах производилась с применением методов оптической микроскопии и цифровой обработки изображений. Установлена зависимость концентрации пустот в образцах от величины давления вакуума приложенного к выходному порту формы.

---

Работа выполнена при поддержке Партнерской Программы Скол-тех.

# **К проблеме загрязнения призабойной зоны пласта в результате взаимодействия закачиваемых и пластовых флюидов**

**Мусакаев Н.Г., Ахметзянов Р.Р.**

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН

В работе для условий Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения представлен анализ проблемы образования блокирующего слоя в призабойной зоне скважины после массового применения гидравлического разрыва пласта. Приведены пути решения проблемы блокирующего слоя, который является продуктом взаимодействия носителя пропанта (геля), пластовых флюидов (пластовой воды и углеводородов) и механических примесей. Предложен алгоритм выполнения работ по обработке прискважинной зоны пласта, характеризующейся высокой степенью загрязнения блокирующим слоем, растворами специальных составов с целью повышения продуктивности скважин.



# Математическое моделирование процесса разложения газового гидрата в пласте на газ и лед

Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН

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

---

Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-6987.2016.1).

# Численное исследование процесса нагнетания теплого газа в пористый пласт

Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л., Бельских Д.С.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН

В работе осуществлена постановка задачи о нагнетании в пористый пласт, заполненный в начальном состоянии гидратом и газом, теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа. Для решения данной задачи в одномерной плоскопараллельной постановке разработана математическая модель неизотермической фильтрации газа с учетом диссоциации газового гидрата. Эта модель базируется на уравнениях сохранения масс, уравнении Дарси, уравнении состояния реального газа (уравнение Латонова–Гуревича), а также уравнении притока тепла. Разработан алгоритм решения с учетом оригинального метода для расчета гидратонасыщенности; представлены результаты расчетов задачи нагнетания теплого газа в насыщенный гидратом и газом пористый коллектор.

---

Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-6987.2016.1).

# Математическое моделирование СВЧ электромагнитного воздействия на эмульсионные системы

Мусин А.А., Тухбатова Э.Р., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет

Рассматриваются тонкодисперсные и коллоидно-дисперсные эмульсионные системы, в которых гравитационное осаждение капель практически невозможно. Размеры капель настолько малы, что в таких системах превалируют межмолекулярные силы. При этом определяющую роль будет играть соотношение между совокупностью всех сил, действующих на капли. Для определения эффективности СВЧ ЭМ воздействия на водонефтяные эмульсии предлагается неизотермическая математическая модель, записанная в диффузионном приближении, с учетом свободноконвективных течений жидкости, возникающих в среде при изменении ее температуры и концентрации капель воды в несущей фазе. Диссипация энергии СВЧ поля моделируется в виде распределенных источников тепла, значения которых зависят от концентрации капель воды в эмульсии. Считается, что сферические капли не меняют свою форму и имеют одинаковый размер. Слияние капель не учитывается. Задача решается с использованием открытого программного пакета «OpenFOAM». Показано, что под действием СВЧ поля возникает тепловая конвекция в жидкости, которая при определенном соотношении параметров среды может препятствовать осаждению капель.

---

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-9398.2016.1.

# **Численное исследование фильтрации «сухого» газа в низкопроницаемом пласте в скважине с трещиной гидроразрыва**

**Мухаметова З.С.**

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Теоретические исследования по изучению фильтрации «сухого» газа в низкопроницаемых коллекторах в условиях применения массивного гидроразрыва пласта являются актуальными. В работе приведены результаты численного исследования задачи о притоке газа к скважину с трещиной гидроразрыва пласта. При моделировании PVT-свойств газа использовалась методика Пенга–Робинсона. Распределение давления в продуктивном газовом пласте и техногенной трещине определяется уравнением пьезопроводности. При этом решалось одномерное уравнение в трещине и двухмерное уравнение в продуктивном пласте. Задача решалась конечно-разностным методом по итеративной схеме Ньютона. Численные расчеты выполнялись на неравномерной прямоугольной разностной сетке с распределенными узлами. Моделирование выполнялось при различных параметрах трещины и проницаемости продуктивного пласта. Изучено влияние параметров трещины и пласта на кривые распределения давления в системе «трещина–пласт» и динамику притока газа к скважине.

# О фильтрационных волнах давления в трещине, находящейся в пористой и проницаемой среде

Нагаева З.М.<sup>1</sup>, Шагапов В.Ш.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>3</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

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

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

# Исследование течения жидкости через канал с подвижным гидросопротивлением

Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В работе изучалась динамика течения жидкости через канал с цилиндрическим гидросопротивлением на основе решения уравнений Навье–Стокса методом конечных элементов. Рассмотрены два вида подвижных границ гидросопротивления: радиус гидросопротивления не меняется, а его центр движется вдоль стенки трубы вправо (подвижное «сжимающее кольцо»); радиус гидросопротивления непрерывно меняется со временем при неподвижном центре.

В случае первого вида движения границы получено, что профиль скорости на входе и выходе не меняется со временем; в проходном отверстии устанавливается ламинарное течение, а вблизи границы образуются устойчивые вихри, движущиеся поступательно вдоль слоя со скоростью движения границы, но с неизменной формой; расход жидкости зависит линейно от скорости движения границы.

При сжимании канала во втором случае показано, что расход жидкости зависит от величины проходного отверстия нелинейно; течение является ламинарным и нестационарным; профиль скорости на входе и выходе остается параболическим, но с амплитудой, зависящей от радиуса гидросопротивления.

# Исследование акустического излучения от одиночной звуконепроницаемой сферы при внешнем воздействии

Насибуллаева Э.Ш.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В работе исследуется рассеяние от одиночной звуконепроницаемой сферы при прохождении двух видов волн: сферической волны от монополюсного источника излучения и плоской волны. Случай одиночной сферы интересен с практической точки зрения, поскольку позволяет проводить сравнение с результатами существующих экспериментальных и расчетных данных других исследователей для произвольно падающего поля, что в дальнейшем позволит тестировать алгоритмы акустического рассеяния от множества сфер, расположенных произвольным образом в пространстве.

При решении уравнения Гельмгольца используется численная техника, основанная на быстром методе мультиполей, которая позволяет достичь высокой точности получаемых результатов, а также минимизировать машинное время. Проведено сравнение расчетов с известными экспериментальными данными и получено хорошее соответствие.

Проведен численный параметрический анализ значения потенциала на поверхности сферы для различных значений ее радиуса, комплексного сопротивления, вида внешнего воздействия и т.п. Получены формулы для основной характеристики поля рассеяния – полного сечения рассеяния, для сферы с произвольным акустическим импедансом; показана ее зависимость от основных параметров системы «сфера–окружающая среда» для двух видов падающего поля.

# **Использование установки «купол-сепаратор» для ликвидаций придонных прорывов скважин добычи углеводородов**

**Насыров А.А.**

Бирский филиал Башкирского государственного университета

Рассматриваются теоретические основы функционирования «купола-сепаратора», предназначенного для сбора и последующей отгрузки газо-нефтяных выбросов в случае разрыва скважины вблизи дна глубоких водоемов, когда термобарические условия благоприятны для образования газогидрата. Построена математическая модель описывающая процесс наполнения и выброса углеводородов из купола при условиях гидратообразования, а так же описана динамика изменения температуры фаз.



# Термомеханическая модель определения устойчивости склонов криолитозоны

Нигаметьянова Г.А., Хабибуллин И.Л.

Башкирский государственный университет

Предложена модель для оценки устойчивости склонов криолитозоны, которая включает механическую и теплофизическую составляющие. Механическая составляющая модели построена на основе баланса сил, действующих на элемент грунта в процессе его протаивания. Устойчивость склона наряду с механическими свойствами грунта, зависит от толщины талого слоя  $l$ , эта величина в свою очередь определяется на основе теплофизической модели, основанной на условии теплового баланса поверхности склона. Разработанная модель определения устойчивости склонов в процессе протаивания многолетнемерзлых пород позволяет оценить коэффициент устойчивости склонов в зависимости от времени и множества параметров: теплофизические и механические свойства слагающих склон грунтов, составляющие радиационного баланса, экспозиция и угол наклона склона и т.д.

# Исследование течения термовязкой жидкости в плоском канале с сужением

Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Одним из важнейших вопросов гидродинамики является устойчивость течения жидкости. Ранее уже была рассмотрена проблема устойчивости течения термовязкой жидкости в плоском канале с неоднородным температурным полем и было показано, что температурная зависимость вязкости оказывает влияние на устойчивость течения жидкости. Для дальнейшего изучения устойчивости течений термовязких жидкостей необходимо провести дополнительные исследования.

В данной работе рассмотрена задача о возможности регулирования гидравлического сопротивления за счет локального теплового воздействия. Исследовано течение жидкости с температурной зависимостью вязкости в плоском канале с сужением. Численно получены профили скоростей течения термовязкой жидкости.

# О многоконтинуальном подходе к моделированию многофазных течений при гидроразрыве пласта

Осищов А.А.

Сколковский Институт Науки и Технологий

Технология гидравлического разрыва нефтегазоносного пласта основана на закачке жидкости с твердыми частицами под большим давлением (несколько сотен атмосфер) через скважину для создания трещин в пористой среде, которые заполняются частицами. После остановки закачки, трещины, заполненные плотно упакованным гранулированным материалом, создают каналы высокой проницаемости для транспортировки углеводородов из глубин пласта к скважине и на поверхность. Скважины могут быть как вертикальными, тогда формируется одна вертикальная трещина, состоящая из двух в общем случае симметричных крыльев, так и окологоризонтальными с несколькими кластерами перфораций, обеспечивающих доступ из скважины к породе (так называемый многостадийный гидроразрыв пласта, как правило используемый в низкопроницаемых породах). В последнем случае формируется несколько трансверсальных трещин.

Рассматриваются четыре класса многофазных течений, описываемых в рамках многоконтинуального подхода [Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987], которые соответствуют различным стадиям технологии гидроразрыва пласта, а именно: (i) течение суспензии жидкости с частицами в круглой трубе (скважине) при больших числах  $Re$  во время закачки, (ii) течение суспензии в узкой вертикальной трещине гидроразрыва при небольших числах  $Re$  во время закачки [Boronin, S.A. and Osiptsov, A.A., 2010. Two-continua model of suspension flow in a hydraulic fracture. *Doklady Physics* . 55(4), 199–202], (iii) фильтрация суспензии через плотную упаковку частиц в закрытой трещине гидроразрыва при очистке [Boronin, S.A., Osiptsov, A.A. and Tolmacheva, K.I., 2015. Multi-fluid model of suspension filtration in a porous medium. *Fluid Dynamics*, 50(6), pp.759-768], и (iv) многофазное газо-жидкостное течение с примесью твердых частиц в круглой трубе (скважине) при старте, гидродинамическом исследовании скважин (ГДИС), и выводе скважины на стационарный режим добычи в широком диапазоне числе  $Re$  [Krasnopolsky, V., Starostin, A. and Osiptsov, A.A., 2016. Unified graph-based multi-fluid model for gas-liquid pipeline flows. *Computers & Mathematics with Applications*, 72(5), pp.1244-1262]. Обсуждаются преимущества применения многоконтинуального подхода [Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987] по сравнению с полуэмпирическими упрощенными моделями, такими как модель эффективной жидкости для транспорта суспензий в трещинах гидроразрыва и модель дрейфа для газо-жидкостных течений в скважинах.

# Изотермическое течение магнитной жидкости в микроканалах прямоугольного сечения

Отрощенко А.А.<sup>1</sup>, Колчанов Н.В.<sup>1</sup>, Колчанова Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН

Экспериментально изучалось изотермическое течение магнитной жидкости и жидкости-носителя в микроканалах прямоугольного сечения. В качестве исследуемого образца бралась магнитная жидкость, изготовленная на основе углеводородной жидкости-носителя (например, трансформаторного масла). Магнетитовые частицы, взвешенные в жидкости-носителе, имеют средний размер 9–10 нм.

В эксперименте использовались микрожидкостные чипы с каналами, которые изготавливались в соответствии со стандартными методами литографии. Длина каналов составляла 20 мм, а стороны их прямоугольного сечения варьировались от 50 до 500 мкм. Жидкость подавалась в чип по трубкам, связывающим его с системой контроля потоков Elveflow. В состав этой системы входят расходомер и контроллер давления, который регулировал перепад давления на концах каналов, поддерживая заданный расход жидкости.

Получены графики зависимости расхода жидкости в микроканалах от перепада давления для разных прямоугольных сечений каналов. Построен график зависимости безразмерного расхода от отношения сторон прямоугольного сечения каналов. Проведено сравнение данных для магнитной жидкости и жидкости-носителя.

# Трехмерное численное моделирование распределения давления и температуры в пласте и скважине

Питюк Ю.А.<sup>1,2</sup>, Зарафутдинов И.А.<sup>1</sup>, Сельтикова Е.В.<sup>1</sup>,  
Мусин А.А.<sup>1</sup>, Давлетбаев А.Я.<sup>2</sup>, Ковалева Л.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет

<sup>2</sup> ООО «РН-УфаНИПИнефть»

Интерпретация данных гидродинамических исследований (ГДИС) позволяет оценить состояние пласта и решить вопрос о проведении соответствующих геолого-технических мероприятиях. В связи с тем, что ГДИС не дает подробной информации о состоянии призабойной зоны пласта (ПЗП), то одним из способов расширения числа определяемых параметров является учет динамики температуры в действующей или остановленной скважине.

Целью данной работы является разработка программного модуля для численного исследования распространения температуры и давления в скважине и пласте в отсутствие и при наличии трещины гидроразрыва пласта (ГРП). Численная методика основана на методе контрольного объема. Рассматривается трехмерная математическая модель пласта и одномерная модель скважины с учетом конвективного, кондуктивного теплопереноса, а также адиабатического эффекта и эффекта Джоуля–Томсона. Трехмерная постановка задачи позволяет не только моделировать распространение температуры и давления в пласте и скважине с учетом температурных эффектов, но и учитывать сложную конструкцию скважины, трещины ГРП различной геометрии, анизотропию пласта. Однако трехмерная модель пласта приводит к высокой вычислительной сложности, поэтому для ускорения расчетов применялись графические ускорители.

Анализ результатов показал, что при наличии трещины ГРП температурные эффекты проявляются сильнее. Эффекты, оказывающие влияние на температуру в нагнетательной скважине, существенно отличаются от температурных эффектов, проявляющихся в добывающих скважинах. Динамика температуры в скважине, ПЗП, а также по стволу скважины может существенно отличаться. На границах «скважина–трещина ГРП» и «трещина ГРП–пласт» наблюдается дроссельный разогрев жидкости.

Результаты численного исследования могут быть полезны при планировании мероприятий на скважинах, а также при внедрении новых технологий.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-3503.2017.8, грантов РФФИ № 16-31-00029, № 16-31-00423.

# Экспериментальные исследования течения обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах

Рахимов А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Представлены результаты гидродинамических и реологических исследований обратных водоуглеводородных эмульсий. В потокоотклоняющих технологиях и при глушении скважин используют составы эмульсии, обладающие коагуляционными свойствами. Помимо высокой вязкости эмульсий, ключевую роль играет эффект динамического запираания, заключающийся в замедлении скорости потока в капиллярах и трещинах на 3–4 порядка, несмотря на постоянно действующий перепад давления. По ранее высказанному предположению, данный эффект возникает при больших градиентах давления за счет «трения» оболочек из ПАВ микрокапель воды, деформации капель и их скопления во входной зоне микроканала.

Реологические исследования водоуглеводородных эмульсий показывают увеличение вязкости с увеличением дисперсности эмульсий и более быстрое возникновение динамического запираания. Увеличение концентрации водной фазы в эмульсии приводило к увеличению плотности упаковки микрокапель воды и увеличению её вязкости. При течении с постоянным перепадом давления в микрожидкостных устройствах, изготовленных методом мягкой фотолитографии, использование высокоскоростной камеры позволило увидеть при запираании деформацию микрокапель воды в эмульсии, приготовленной из простых химических соединений. Движение происходило по каналам, между кластерами из деформированных капель, не соответствующим радиальному направлению течения. Микрокапли при прохождении узкой части дробились на более мелкие, увеличивалась плотность упаковки за счет увеличения локальной концентрации и дисперсности, а значит, увеличивалась вязкость в этих областях, приводящая к замедлению течения. Изучение движения водоуглеводородной эмульсии с постоянным расходом, соответствующим заданному перепаду давления, показало симметричное движение микрокапель воды по линиям тока в области сужения, при движении микрокапли деформировались, но не дробились на более мелкие, вытягиваясь только в области сужения.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-31-00294-мол\_а «Экспериментальные исследования течения водоуглеводородных дисперсий в микроканалах»

# Экспериментальное исследование взаимодействия пузырьковых сред с акустическим полем

Саметов С.П.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Работа посвящена результатам экспериментальных исследований динамики пузырьковых жидкостей в акустическом поле. Манипулирование газовыми пузырьками, находящимися в жидкости, с помощью акустического поля представляет обширный интерес для множества технических и научных задач: перемешивание, образование напорного течения в микроканалах, перенаправление движения частиц, изменение оптических свойств в микропотоках жидкостей, образование микророторов, градиента концентрации веществ, перемещение микрочастиц [Huang P.H. et al. A single-layer, planar, optofluidic switch powered by acoustically driven, oscillating microbubbles // Applied physics letters. 2012. V. 101, No 14. P. 141101; Ahmed D. et al. Tunable, pulsatile chemical gradient generation via acoustically driven oscillating bubbles // Lab on a chip. 2013. V. 13, No 3. Pp. 328–331]. При самоорганизации множества пузырьков в ультразвуковом поле интенсивностью ниже кавитационного порога экспериментально обнаруживается выталкивание пузырьков воздуха в воде от источника поля независимо от его положения в пространстве [Gumerov N.A. et al. Robust acoustic wave manipulation of bubbly liquids. // Applied Physics Letters. 2016. V. 108, No 13. P. 1341021–2]. При этом возникает область, практически очищенная от пузырьков, в которой распределение поля давления постоянно меняется с движением фронта пузырьков, что формирует двустороннее взаимодействие системы «пузырьки–поле». Данный эффект открывает потенциальные методы управления множеством пузырьков посредством ультразвукового поля. В настоящей работе рассмотрено влияние различных параметров пузырьковой жидкости (концентрация пузырьков, вязкость среды) на характер очистки среды от пузырьков.

# **Автоматизированный анализ взаимовлияния скважин в процессе мониторинга разработки низкопроницаемых коллекторов**

**Сахибгареев Э.Э.<sup>1</sup>, Иващенко Д.С.<sup>2</sup>, Мусин А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Башкирский государственный университет

<sup>1</sup> ООО «РН-УфаНИПИнефть»

К особенностям месторождения А относятся сложное геологическое строение, резкая изменчивость свойств объектов по разрезу и площади, низкая проницаемость и высокая расчлененность пластов. Современные кустовые насосные станции позволяют развивать высокие устьевые давления при закачке жидкости в пласт.

При высоком давлении закачки и его превышении над давлением разрушения породы наблюдается самопроизвольное развитие техногенных трещин – так называемый «эффект автоГРП».

Данный эффект приводит к резкому обводнению добывающих скважин. В настоящее время поиск источников обводнения выполняется вручную и в ряде случаев занимает продолжительное время. Наша работа посвящена решению задачи автоматизации поиска источника обводнения с целью управления закачкой, а также задачи построения карты взаимовлияния скважин для выбранного участка месторождения.



# **Экспериментальные исследования воздействия высокочастотного электромагнитного поля на модель призабойной зоны пласта**

**Сектаров Э.С., Шашков А.В.**

Башкирский государственный университет

В данной статье рассматривается воздействие высокочастотного электромагнитного поля на призабойную зону пласта и изменение физических свойств нефти при этом воздействии. Обосновывается идея на том, что мировых запасов «легкой» нефти становится все меньше, но залежи «тяжелой» нефти остаются нетронутыми, и данный способ воздействия сможет упростить добычу битумной нефти. Обосновывается мысль о том, что высокочастотное воздействие имеет большие возможности в сфере нефтедобычи.

# Исследование процесса самовоспламенения углеводородной смеси в пористой среде на основе безразмерных параметров

Сельтикова Е.В., Мусин А.А., Марьин Д.Ф.,  
Тухбатова Э.Р., Ахатов И.Ш.

Башкирский государственный университет

В работе рассматривается математическая модель одномерной плоской задачи о зарождении и распространении очага внутрипластового горения в условиях неизотермической трехфазной фильтрации с фазовыми переходами и химическими реакциями в недеформируемой пористой среде. Математическая модель включает в себя уравнения массового баланса фаз и компонентов, уравнение баланса энергии, дополненные соответствующими замыкающими соотношениями. Приняты следующие допущения и предположения: жидкие фазы несжимаемы; газовая фаза сжимаема и описывается уравнением состояния совершенного газа; газ состоит из водяного пара, кислорода и инертного газа; газовые компоненты в нефти и воде не растворяются; учитывается теплообмен с окружающей средой. Система уравнений математической модели решается численно с использованием метода контрольного объема и IMPES-метода. В процессе анализа системы уравнений математической модели были выделены оригинальные безразмерные комплексы, составленные из параметров Франк-Каменецкого, Пекле, Био и нефтенасыщенности, характеризующие взаимодействия процессов, протекающих при внутрипластовом горении. Представлены результаты многопараметрического анализа задачи внутрипластового горения на основе этих безразмерных комплексов. На основе проведенных расчетов строится диагностический график, который позволяет определить возможность применения методики.

---

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ №16-31-00423  
Мол\_а.

# Инвариантные подмодели ранга два гидродинамического типа

Сираева Д.Т.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Для уравнений гидродинамического типа с давлением, разделенным в сумму функций плотности и энтропии, построены инвариантные подмодели ранга два стационарного и эволюционного типа. [Сираева Д.Т. Оптимальная система неподобных подалгебр суммы двух идеалов // Уфимский математический журнал. Т. 6, № 1 (2014) С. 94–107; Мамонтов Е.В. Инвариантные подмодели ранга два уравнений газовой динамики // Прикладная механика и техническая физика. Т. 40, № 2. 1999. С. 50–55; Хабиров С.В. Приведение инвариантной подмодели газовой динамики к каноническому виду // Математические заметки. Т. 66, Вып. 3. 1999. С. 439–444]

# Области неопределенности в задачах восстановления функциональных зависимостей

Спивак С.И., Кантор О.Г.

Башкирский государственный университет

Решение задачи восстановления функциональных зависимостей  $y = f(\bar{x}, \bar{a})$  заданного типа (где  $\bar{x}$  — вектор экзогенных переменных, значения которых известны из наблюдений;  $\bar{a}$  — вектор параметров), осуществляется по результатам применения специальных математических методов, развиваемых в рамках направления, называемого математической обработкой наблюдений. По сути, такие задачи сводятся к определению вектора  $\bar{a}$ .

Классическая постановка задач математической обработки наблюдений состоит в поиске таких параметров математического описания, при которых минимизируется какой-либо критерий соответствия расчетных и экспериментальных данных. Одним из самых распространенных способов задания такого критерия является сумма квадратов отклонений расчетных данных от экспериментальных, составляющий в рамках статистического подхода основу метода наименьших квадратов (МНК). Известно, что в случае, если погрешность эксперимента (погрешность измерений) распределена по нормальному закону, значения параметров модели, рассчитанные по МНК, являются в некотором смысле наиболее вероятными. Однако установление закона распределения погрешности — самостоятельная и достаточно трудоемкая задача, которая сводится к многократному воспроизводству эксперимента в одних и тех же условиях, что далеко не всегда является осуществимым. Более того, исследователь может обладать некоторой априорной информацией, касающейся ограничений на предполагаемые значения параметров модели, существующих связей между переменными, предполагаемых прогнозных значений и пр. Естественным является желание учесть такую информацию, что в рамках статистического подхода не представляется возможным. Следует также отметить, что статистические методы не работают в достаточно часто встречающихся на практике условиях ограниченности экспериментальной информации.

Все это обуславливает необходимость разработки специальных методов определения параметров функциональных зависимостей, что и составляет предмет настоящей работы.

# **Нагнетание диоксида углерода в пористый пласт, насыщенный льдом и гидратом метана**

**Столповский М.В.**

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Представлена математическая модель нагнетания газообразного диоксида углерода в пористую среду, изначально насыщенную льдом и гидратом метана. Рассмотрены различные режимы нагнетания, сопровождающиеся образованием гидрата  $\text{CO}_2$ . Получены численные решения, описывающие изменение давления и температуры в пласте конечной протяженности

# **Исследования процессов взаимодействия электромагнитных полей с нефтенасыщенными пористыми средами**

**Султангужин Р.Ф.**

Башкирский государственный университет

Истощение традиционных нефтяных месторождений является острым вопросом, вынуждающим к разработке месторождений трудноизвлекаемой нефти, которые характеризуются сложным геологическим строением, низкой проницаемостью, высокой вязкостью и сложной реологией нефти. Эффективная разработка таких месторождений не может быть обеспечена существующими технологиями. Необходимы новые инновационные технологии, которые повысят эффективность разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти и сделают ее экономически целесообразной.

Метод нагрева призабойной зоны пласта с использованием энергии электромагнитного поля представляется наиболее эффективным и перспективным. Основная цель использования электромагнитного поля – нагрев пласта для снижения вязкости нефти. Температура среды повышается за счет трения осциллирующих в переменном электромагнитном поле молекул с дипольными моментами.

# Течение газа в канале, содержащем лед, сопровожаемое его тепловым разрушением

**Тазетдинов Б.И.**

Бирский филиал Башкирского государственного университета

В данной работе рассмотрена задача теплового разрушения газожидкостным потоком вертикального канала (скважины), в основном состоящего из льда. В математической модели принято, что в канал на входе подается теплый газ, который, по мере продвижения по каналу, отдает часть своей энергии стенкам канала. При этом происходит их тепловое разрушение, продукты которого (вода и порода) за счет высокого давления выносятся потоком к поверхности. В результате численного решения задачи показана динамика изменения основных параметров потока в процессе теплового разрушения скважины.

# Динамические процессы в каплях слабозакрученных нематиков в электрическом поле

Тимиров Ю.И., Басырова Е.Р., Скалдин О.А.

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

Экспериментально исследуются динамические структуры в немтохолестерических каплях радиусом  $R < 25$  мкм и диапазоном шага спирали  $240 > P > 72$  мкм в электрическом поле. Как известно, в зависимости от соотношения радиуса  $R$  капли к равновесному шагу  $P$  холестерической спирали, возможна реализация различных сценариев неустойчивостей и структурных превращений. В ходе экспериментального исследования, обнаружены периодические процессы рождения и схлопывания структурных «стенок». Для этих процессов получены зависимости циклической частоты  $\omega$  от приложенного электрического поля  $E$ . Показано, что для данного соотношения  $R/P$  развивается электрогидродинамическая неустойчивость в виде электроконвективных вихрей, отвечающим за возможный механизм наблюдаемого явления.

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 15-02-09366, 17-42-020794 p\_a) и стипендии президента РФ СП-183.2016.1. В экспериментальных исследованиях использовалось оборудование ЦКП «Спектр» ИФМК УНЦ РАН и РЦКП «Агидель»



# Оптимизация работы периодического режима нефтяной скважины с помощью методов математического моделирования

Топольников А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>2</sup> ООО «РН-УфаНИПИнефть»

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

В докладе представлено описание математических моделей элементов скважины, насоса и призабойной зоны пласта, которые позволяют описать нестационарные процессы, связанные с движением многофазного потока в пласте, обсадной колонне, насосе, колонне насосно-компрессорных труб и затрубном пространстве скважины. Приводится обсуждение адекватности применения квазистационарной модели. На примере ряда скважин проводится моделирование текущего и поиск оптимального режима эксплуатации скважин в периодическом режиме.

# Математическое моделирование течений запыленных сред в акустических и ударноволновых полях

Тукмаков Д.А.

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

Численное моделирование ударноволновых процессов в газозвезях выявило, что при прохождении ударной волны из чистого газа в газозвесь, формируется участок с увеличенной средней плотностью дисперсной фазы, что приводит к замедлению продвижения волны сжатия в запыленную среду. В тоже время при прохождении волны сжатия из запыленной среды в чистый газ волна сжатия движется практически в чистом газе. Математические расчеты для модели полидисперсного аэрозоля показали, что воздействие на парокapельный поток многофракционного состава резонансными волновыми полями позволяет уменьшить концентрацию мелкодисперсных фракций смеси за счет коагуляции частиц разных фракций.

# Моделирование работы системы охлаждения возвратного этилена

Уразов Р.Р.

Ишимбайский филиал Уфимского государственного авиационного технического университета

В работе на основе методов и уравнений механики многофазных сред получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая гидродинамические и тепломассообменные процессы в противоточных теплообменниках типа «труба в трубе», где по внутренней трубе течет смесь этилена и полиэтилена, а в межтрубном пространстве противотоком движется вода. Течение газовой смеси осложнено «налипанием» жидкого полиэтилена на стенках трубы. При описании процесса образования полимерной пленки рассмотрен один из возможных механизмов поступления жидких частиц полиэтилена из турбулентного ядра к поверхности трубы - турбулентная диффузия. Представлены результаты исследований по динамике накопления полиэтиленовой пленки на внутренней поверхности газового холодильника возвратного этилена. Установлено, что формирование профиля отложений носит сложный характер: максимум толщины пленки смещается к выходному сечению канала.

# **Термодинамические аспекты течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры**

**Урманчиев С.Ф., Киреев В.Н.**

Институт механики им. Р.Р.Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается ламинарный режим течения жидкости с переменными физико-механическими параметрами в канале теплообменника.

В исследованиях, проведённых авторами ранее, были обнаружены такие особенности течения жидкостей с немонотонной зависимостью вязкости от температуры, которые позволили классифицировать их как существенное дополнение к общей картине течения жидкостей с постоянной вязкостью или вязкостью, меняющейся по аррениусовскому закону.

В данной работе будут представлены новые результаты, основанные на включение в математическую модель термодинамических потенциалов. Целью исследования было математическое описание течения полимерных жидкостей в неоднородном температурном поле вблизи стенок канала. Кроме того будут представлены результаты по исследованию режимов установления потока полимерной жидкости.

# Идентификация потенциала специального вида в задаче Штурма–Лиувилля

Утяшев И.М.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается задача определения потенциала  $q(x)$  специального вида по собственным частотам колебаний. В частности, рассматривается потенциал вида  $q(x) = q_1 + q_2x$ , который описывает линейное изменение коэффициента упругости среды. Показано, что коэффициенты  $q_1$  и  $q_2$ , характеризующие линейное изменение коэффициента упругости среды, однозначно определяются по трем собственным частотам струны, колеблющейся в этой среде.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 16-31-00077-мол\_а

# **Определение вида и параметров дефекта стержня по собственным частотам его продольных колебаний**

**Фазлетдинова Д.Р.**

Башкирский государственный университет

Показано, что вид дефекта стержня (трещину, полость, налипание инородных масс), а также его параметры (например, глубину раскрытой трещины, или объем малой полости) можно однозначно определить по трем собственным частотам продольных колебаний стержня. Приводится пример определения вида и параметров дефекта.

# Анализ спектра собственных частот и собственных форм колебаний композиционной лопатки компрессора

Филиппов А.А.<sup>1</sup>, Павлов В.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

Рабочие лопатки осевых компрессоров ГТД являются наиболее нагруженными узлами компрессора, поскольку подвержены инерционным, газодинамическим и температурным воздействиям. Требования, предъявляемые к современным двигателям, уже превосходят возможности рабочих лопаток из традиционных инженерных материалов. Поэтому задача применения композиционных материалов, имеющих высокие удельные прочностные характеристики, при создании высоконагруженных узлов компрессора, является актуальной.

Макроскопические свойства композиционных материалов, в отличие от традиционных инженерных материалов, не являются изотропными, а зависят от ориентации осей системы координат, относительно которых определяются эти свойства. Вследствие этого осложняется процедура экспериментального определения упругих констант композиционного материала. Поэтому важным является разработка методов теоретического или численного прогнозирования макроскопических упругих характеристик композиционных материалов.

В работе представлены результаты численного расчета собственных частот и собственных форм колебаний композиционной рабочей лопатки осевого компрессора ГТД, и приведены результаты численного расчета макроскопических упругих характеристик композиционного материала рабочей лопатки. Также был произведен сравнительный анализ собственных частот композиционной рабочей лопатки и её аналога из титанового сплава.

# Законы сохранения для вязкой жидкости

Хабилов С.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости записываются в дивергентном виде (законы сохранения). Уравнения допускают бесконечномерную алгебру Ли операторов. По каждому базисному оператору построен нетривиальный закон сохранения. Новые законы сохранения можно получить вычислением производящих операторов. Порядок закона сохранения совпадает с порядком производных входящих в координаты производящих операторов. Нетривиальные законы сохранения, полученные по допускаемым операторам, первого порядка. Вычислены производящие операторы нулевого порядка. Обсуждается проблема вычисления всех возможных производящих операторов первого порядка.



# **Определение скорости движущейся трехслойной полосы и толщины ее заполнителя по собственным частотам изгибных колебаний**

**Хакимов А.Г.**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Исследованы собственные поперечные колебания участка постоянной длины прямолинейной трехслойной полосы с заполнителем, движущейся вдоль нейтральной линии недеформированного состояния. Перемещение происходит между двумя фиксированными осевыми направляющими (зажимами), расстояние между которыми равно длине колеблющейся части полосы. Предполагается, что вдоль нейтральной линии действует постоянная продольная сила. Получено, что с увеличением скоростного параметра происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний трехслойной полосы с заполнителем. Показано, что с увеличением толщины заполнителя происходит увеличение собственных частот изгибных колебаний полосы. По двум частотам изгибных колебаний можно определить скорость и толщину заполнителя движущейся трехслойной полосы с заполнителем. Результаты работы могут находить технические применения в задачах динамики и прочности машин и механизмов при производстве трехслойных полос с заполнителем и могут быть применены для определения скорости полосы и толщины заполнителя по двум собственным частотам изгибных колебаний.

# Расчет сжатия парового пузырька в жидкости

Халитова Т.Ф.

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук

Представляется методика расчета сильного сжатия парового пузырька в жидкости, основанная на TVD-модификации метода Годунова второго порядка точности, приводятся результаты ее тестирования. В методике учитываются сжимаемость пара и жидкости, сильная неоднородность распределения параметров в паре и в жидкости, а также образование ударных волн в пузырьке в финале сжатия. Эффективность данной методики оценивается сравнением с аналогичной методикой первого порядка точности. Для иллюстрации применимости представлены результаты расчета одного из возможных сценариев сжатия парового пузырька в жидкости.

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-01-00433).

# Инжекция углекислого газа в пористую среду, сопровождающаяся гидратообразованием

Хасанов М.К.

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

На основе уравнений механики многофазных сред построена математическая модель инъекции углекислого газа в горизонтальный пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии метаном и его газогидратом. Получены автомодельные решения одномерной задачи, описывающие распределения основных параметров в пласте. На основе анализа полученных решений показано, что исследуемый процесс может происходить в двух режимах. В первом режиме происходит замещение метана углекислым газом в гидрате. Этот режим характерен для высоких значений проницаемости и давления закачиваемого газа, а также низких значений пористости и исходного давления пласта. Во втором режиме происходит разложение гидрата метана на газ и воду с последующим образованием гидрата диоксида углерода из углекислого газа и воды. Установлено, что для величины давления инъекции существует некоторое предельное значение, зависящее от температуры закачиваемого газа и проницаемости пласта, при превышении которого реализуется первый режим.

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан в рамках научного проекта № 17-48-020123  
р\_а

# Особенности течения Куэтта термовязкой жидкости в замкнутой области

Хизбуллина С.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В работе рассматривается задача о течении термовязкой жидкости в кольцевой области между двумя коаксиальными цилиндрами ограниченной высоты, в предположении, что внутренний цилиндр вращается с постоянной угловой скоростью, а внешний – покоится. Математическая модель течения Куэтта строится в предположении, что жидкость несжимаемая, течение является осесимметричным и ламинарным, а массовые силы отсутствуют. Параметры жидкости, такие как вязкость и теплопроводность считаются зависящими от температуры. Численное исследование поставленной задачи основано на методе контрольного объема модифицированного для учета переменных свойств жидкости. Проведен анализ влияния температурной зависимости вязкости и теплопроводности на структуру конвективного течения Куэтта термовязкой жидкости. Показано, что в зависимости от параметров аномалии вязкости могут возникать различные режимы течения, что отражается на образовании и динамике вихревой структуры течения. Меняя параметры аномалии вязкости или угловую скорость вращения внутреннего цилиндра, можно получить различные картины течения.

# Моделирование нестационарной фильтрации вокруг скважины с трещиной гидроразрыва

Хисамов А.А.

ООО «РН-УфаНИПИнефть»

В данной работе приведены результаты математического моделирования нестационарного притока жидкости из пласта в скважину через трещину гидроразрыва. Было построено аналитическое решение задачи о распределении давления при нестационарной фильтрации жидкости вокруг скважины, пересеченной вертикальной трещиной гидроразрыва, при задании постоянного дебита на скважине. При этом, решая уравнения фильтрации методом преобразования Лапласа, получены выражения для распределения давления в трещине и в пласте.

# **Определение вида и параметров дефекта стержня по пяти собственным частотам его изгибных колебаний**

**Хуснутдинова Г.А.**

Башкирский государственный университет

Работа посвящена идентификации вида и параметров дефектов стержней по собственным частотам изгибных их колебаний. В качестве видов дефекта рассматриваются трещины, полости, налипание инородных масс. Показано, что один из таких дефектов и его параметры можно определить по пяти собственным частотам изгибных колебаний стержня.

# Дифференциальная механика жидкостей — новое поколение моделей

Чашечкин Ю.Д.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Дифференциальная механика жидкостей – раздел механики сплошных сред, в котором динамика и структура течений согласованно изучаются теоретически и экспериментально на основе фундаментальной системы уравнений. Среда характеризуется набором материальных параметров – термодинамических (потенциалы и уравнения состояния), кинетических (коэффициенты молекулярного переноса), физически обоснованными граничными и начальными условия.

Фундаментальная система, включающая дифференциальные уравнения неразрывности, баланса импульса, энтропии (энергии), концентрации составляющих веществ, анализируется с учетом условия совместности, которое задает ранг нелинейной системы, порядок ее линеаризованной версии и степень характеристического (дисперсионного) уравнения, определяющие число независимых функций в полном решении. Непрерывные вещественные или комплексные функции полного решения позволяют провести классификацию моделей, определить временные и пространственные масштабы, задающие адекватные требования к методикам численного или лабораторного моделирования.

Универсальность подхода позволяет в единой постановке провести согласованные аналитические, численные и лабораторные исследования процессов свободной многокомпонентной конвекции, включающие течения, индуцированные диффузией на топографии; генерации и распространения внутренних волн; обтекания двух- и трехмерных препятствий; растекания падающей в жидкость капли и сопутствующей генерации звука, в широком диапазоне параметров, включающем традиционные ламинарные, переходные и турбулентные режимы.

# Матричный подход к моделированию газотурбинного двигателя

Черникова М.А., Денисова Е.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Рассматривается подход к моделированию газотурбинного двигателя, в основу которого положено представление динамической характеристики в виде взаимосвязных матриц. Подход описывает взаимодействие параметров матриц, а также возможные переходы между ними. Матричное представление динамической характеристики необходимо для учета динамики двигателя с целью повышения качества управления системой автоматического управления газотурбинным двигателем. Матричный подход предлагается реализовать в виде блока для имитационного моделирования.



## **О нагнетании гидратообразующего газа в пласт снега, насыщенный тем же газом**

**Чиглинцева А.С.**

Бирский филиал Башкирского государственного университета

Решена задача о нагнетании гидратообразующего газа (метана) в снежный массив, в исходном состоянии поры которого насыщены тем же газом. Построены автомодельные решения, описывающие поля температур и давлений, а также распределения насыщенностей снега, воды, гидрата и газа в массиве.

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

## Акустическое сканирование трубчатых каналов с трещинами

Шагапов В.Ш.<sup>1,2</sup>, Галиакбарова Э.В.<sup>3,4</sup>, Хакимова З.Р.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>3</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>4</sup> ООО НПП «НТ-Центр»

Исследуется эволюция возмущений давления распространяющихся в трубе с поврежденным участком в виде трещин. Диссипация энергии из-за вязкого трения и теплопроводности учитывается в тонком слое жидкости или газа вблизи стенки. Рассматривается теоретическая модель распространения акустических сигналов в трубчатом канале. Получены коэффициенты отражения и прохождения в зависимости от характеристик поврежденного участка и физических свойств среды в канале. С учетом дисперсионных соотношений анализируется динамика возмущений давления отраженного и прошедшего через трещину, в зависимости от геометрических характеристик трещины и канала, а также от свойств среды, содержащейся в трубчатом канале.

# Акустическое сканирование трубопроводов, находящихся в грунте, с поврежденными участками

Шагапов В.Ш.<sup>1,2</sup>, Галиакбарова Э.В.<sup>3,4</sup>,  
Хакимова З.Р.<sup>3</sup>, Галиакбаров В.Ф.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>3</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>4</sup> ООО НПП «НТ-Центр»

Эксплуатация магистральных трубопроводов предполагает диагностику технического состояния. Используя методы периодического акустического сканирования трубопроводов по динамике импульсов можно узнать информацию об утечке через поврежденный участок дистанционно с помощью систем контроля. Теория акустического сканирования труб обсадных колон нефтяных и газовых скважин, а также наземных трубопроводов представлена в работах ученых под руководством академика АН РБ, д.ф.-м.н., В.Ш. Шагапова.

Опытно-промышленные испытания, проведенные на магистральных трубопроводах Трансгаза РФ показали, что интеллектуальной системой контроля можно определить места утечек в трубопроводе на ранних стадиях падения давления по импульсам, отраженным от поврежденного участка.

Исследование динамики акустических сигналов в форме гармонической волны в трубах, находящихся в грунте, заполненных жидкостями или газами, с поврежденным участком показали, что амплитуды и фазы отраженного и прошедшего сигналов слабо зависят от флюида, находящегося в канале, а определяется свойствами среды, окружающей трубу и частотными характеристиками сигнала.

# Численное моделирование процесса инъекции холодного газа в слой снега, сопровождаемое гидратообразованием

Шагапов В.Ш.<sup>1,2</sup>, Чиглинцева А.С.<sup>1,3</sup>, Белова С.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>3</sup> Бирский филиал Башкирского государственного университета

Представлена теоретическая модель и получены численные решения для процесса образования гидрата метана при нагнетании газа в снежный массив, изначально насыщенный газом и снегом. Рассмотрены две схемы образования гидрата: диффузионная, в которой интенсивность гидратообразования определяется диффузией газа через гидратный слой, образовавшийся между снегом и газом, и равновесная, в которой давление и температура в пласте связаны равновесным соотношением  $T = T_s(p)$  в зоне одновременно содержащей газ, снег и гидрат. Проанализировано влияние приведенного коэффициента диффузии, давления нагнетаемого газа и проницаемости на скорость образования гидрата. Показано, что с ростом приведенного коэффициента диффузии процесс образования гидрата с учетом диффузионной кинетики стремится к равновесному режиму. В равновесном режиме накопление гидрата в снежном массиве происходит более интенсивно по сравнению с диффузионным режимом.

# Инжекция углекислого газа в пласт, насыщенный метаном и его гидратом

Шагапов В.Ш.<sup>1,2</sup>, Рафикова Г.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме поиска и разработки альтернативных источников энергии. Одними из таких источников являются природные газогидраты, потенциальные запасы метана в которых превышают величину  $1.5 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>. Основными способами разработки газогидратных залежей являются депрессионное воздействие на пласт и нагрев гидратосодержащих пород. Одним из последних инновационных способов извлечения метана из состава гидрата является его замещение диоксидом углерода в газогидрате. Данный метод позволяет одновременно извлечь метан и законсервировать углекислый газ в необходимых объемах.

В работе численно исследован процесс вытеснения метана из газогидратного пласта углекислым газом. Интенсивность замещения метана диоксидом углерода в составе газогидрата определяется диффузией двуокиси углерода через образовавшийся гидратный слой CO<sub>2</sub> к поверхности гидрата метана. Проведен анализ влияния значений приведенного коэффициента диффузии, абсолютной проницаемости и протяженности пласта на динамику и характер протекания процесса. Определены характерные этапы процесса и рассмотрены возможные режимы извлечения метана из газогидратного пласта.

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан в рамках научного проекта № 17-48-020123 р\_а.

# Моделирование процесса замещения метана жидким диоксидом углерода

Шагапов В.Ш.<sup>1,2</sup>, Чиглинцева А.С.<sup>2,3</sup>,  
Белова С.В.<sup>1,2</sup>, Дударева О.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

<sup>3</sup> Бирский филиал Башкирского государственного университета

Как известно, газогидратные залежи являются серьезной альтернативой традиционным ресурсам природного газа. Поэтому актуальной является задача о вытеснении метана из гидратов в результате замещения его другим газом. Опираясь на опытные данные предыдущих исследователей, известно, что для реализации такой реакции замещения целесообразнее всего использовать диоксид углерода, причем диоксид углерода в жидком виде является предпочтительнее газообразного. Технология такого замещения позволила бы совместить добычу природного газа и утилизацию углекислого газа, обладающего парниковым эффектом.

Представлена математическая модель процесса образования газового гидрата при инъекции жидкой двуокиси углерода в снежный массив, насыщенный в исходном состоянии метаном и его газогидратом, находящийся при отрицательных температурах. Построены автоматические решения плоскоодномерной задачи, описывающие динамику изменения полей температур, давлений и фазовых насыщенных в слое гидратного снега. Проведен анализ влияния основных параметров системы на рассматриваемый процесс. Проанализированы условия, при которых реализуются различные режимы процесса замещения.

---

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-20022).

# Пространственные колебания трубопровода со скользящей опорой под действием переменного внутреннего давления

Шакирьянов М.М., Хакимов А.Г.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Исследуются пространственные колебания трубопровода со скользящей опорой под действием переменного внутреннего давления. Колебания трубопровода происходят вокруг оси, проходящей через две опоры, одна из которых считается неподвижной, а другая свободно скользит по идеально гладкой горизонтальной плоскости. Труба, заполненная несжимаемой транспортируемой средой, окружена вязкой несжимаемой жидкостью. Внутреннее давление в трубопроводе задается по гармоническому закону. Учитываются силы гравитации, силы инерции Кориолиса, выталкивающая сила Архимеда, силы вязкого сопротивления и силы, связанные с ускорением поперечного движения трубы в окружающей среде. Деформации трубы, связанные с ее выходом из плоскости изгиба, предполагаются малыми. Поэтому решение задачи приводится к интегрированию системы из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих вращательные и изгибные колебания трубопровода. Далее применением процедуры Бубнова–Галеркина эта система сводится к двум нелинейным обыкновенным дифференциальным уравнениям относительно угла поворота и прогиба средней точки пролета трубы по времени. Для интегрирования полученной системы уравнений при конкретных начальных условиях применяется численный метод Рунге–Кутты. Затем к этому численному решению применяются дискретное преобразование Фурье и отображение Пуанкаре. Вычисления были проведены для стального трубопровода, заполненного транспортируемой жидкостью и окруженного водной средой. Получено, что при принятых значениях основных параметров горизонтальные колебания скользящей опоры трубопровода и его изгибно-вращательные колебания являются непериодическими. Установлено, что при окколорезонансных значениях частот переменного внутреннего давления происходит многократное увеличение амплитуд колебаний. Результаты работы позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние трубопровода и при неблагоприятных режимах его работы разработать мероприятия по защите трубопровода от повреждений и разрушения.

# Приведение инвариантных подмоделей ранга 2 одноатомного газа к простейшему каноническому виду

Шаяхметова Р.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Уравнения движения одноатомного газа допускают группу преобразований с 14-мерной алгеброй Ли. Особенностью данной алгебры является наличие проективного оператора. В работе [Черевко А. А. Оптимальная система подалгебр для алгебры Ли операторов, допускаемых системой уравнений газовой динамики с уравнением состояния  $p = f(S)\rho^{5/3}$ . Новосибирск, 1996. (Препринт/РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики, № 4-96). С. 3–37] построена оптимальная система неподобных подалгебр, включающая 1248 представителей. Подалгебр, содержащих проективный оператор, значительно меньше. Все они представлены в работе [Шаяхметова Р.Ф. Вложенные инвариантные подмодели движения одноатомного газа. Сибирские электронные математические известия, 2014. Т. 11. С. 605–625] в компактном виде (73 представителя).

В работе рассмотрены двумерные подалгебры работы [Шаяхметова Р.Ф. Вложенные инвариантные подмодели движения одноатомного газа. Сибирские электронные математические известия, 2014. Т. 11. С. 605–625]. Для каждой подалгебры построена инвариантная подмодель ранга 2 стационарного типа. Там, где это неочевидно, найдены замены, приводящие подмодель к каноническому виду (на основе способа приведения к каноническому виду подмоделей ранга 3 работы [Хабиров С.В. Приведение инвариантной подмодели газовой динамики к каноническому виду. Математические заметки, 1999. Т.66. Выпуск 3. С. 439–444]). Среди них выбрана замена, после применения которой подмодель принимает наиболее простой канонический вид.



# Теоретическое моделирование роста газогидрата в водном растворе газа

Шепелькевич О.А.

Бирский филиал Башкирского государственного университета

В работе предложено совместное описание диффузионных и температурных полей в водном растворе газа с учетом интенсивности гидратообразования. Для случаев плоской, радиально-симметричной и сферически-симметричной постановок задачи получены значения автомодельной координаты, определяющей рост гидратного слоя в водном растворе газа и пиковые значения температуры в области, содержащей гидрат. Проанализированы температурные поля, связанные с тепловыделением при гидратообразовании. Полученное решение позволяет определить качественную и количественную оценку роста гидрата в зависимости от вида гидратообразующего газа, а также термобарических условий.

# **Исследование нагрева высоковязких нефтей в трубопроводах при высокочастотного воздействия электромагнитного поля**

**Шрубковский И.И.**

Башкирский государственный университет

Разработан новый метод нагрева высоковязких нефтей, также метод может использоваться для предотвращения образования асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) в нефтяном трубопроводе. Данный метод реализуется с применением электромагнитной энергии, которая за счет переменного поля, меняет поляризацию диполей в жидкостях. Проведена серия экспериментов по нагреву высоковязких нефтей и парафиновых отложений высокочастотным (ВЧ) электромагнитным (ЭМ) полем.

# Собственные частоты изгибных колебаний трубопровода

Юлмухаметов А.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Изучаются изгибные колебания трубопровода, провисающего над грунтовыми берегами. Предполагается, что части трубопровода по обе стороны от провисающего участка заделаны в грунт с одинаковыми свойствами. Влияние грунта моделируется распределенной системой пружин с определенными жесткостями в продольном и поперечном направлениях трубопровода. Определяются давление в трубопроводе, коэффициент постели и присоединенная масса грунта основания по собственным частотам изгибных колебаний.

# Исследование процесса движения нагретой капли водонефтяной эмульсии в поле гравитационных сил

Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалёва Л.А.

Башкирский государственный университет

Решается задача о тепловом движении жидкости внутри и вне одиночной капли водонефтяной эмульсии в поле сил тяжести и электромагнитном поле. Математическая модель включает систему уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска в цилиндрической системе координат в аксиально-симметричной геометрии. Для решения поставленной задачи система уравнений, описывающих процесс, приведена к безразмерному виду. Задача решается с использованием метода VOF. Рассматривается влияние тепловой конвекции в окружающей жидкости на оседание капли водонефтяной эмульсии в зависимости от мощности электромагнитного поля и физических характеристик жидкостей.

---

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-9398.2016.1.

# Общий случай движения газа с линейным полем скоростей для эволюционной подмодели ранга 2

Юлмухаметова Ю.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Для одной эволюционной подмодели движения газа ранга 2 ставится задача о нахождении решения в виде линейного поля скоростей. Задача решается в общем виде. Найдены возможные общие решения и представлены примеры движения частиц газа.

# Фильтрация высоковязкой нефти в пласте с использованием технологии парных горизонтальных скважин

Юмагулова Ю.А.<sup>1</sup>, Гиззатуллина А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН

<sup>2</sup> Бирский филиал Башкирского государственного университета

В работе представлена математическая модель задачи о нагревании пласта с высоковязкой нефтью при использовании технологии парных горизонтальных скважин, согласно которой в верхнюю нагнетательную скважину ведется нагнетание теплоносителя, а из нижней добывающей – отбор разогретой продукции. Получены численные решения двумерных уравнений теплопроводности и фильтрации методом конечных разностей с использованием явной схемы.

Научное издание

**Тезисы докладов VI Российской  
конференции «Многофазные системы:  
модели, эксперимент, приложения»  
и школы молодых ученых  
«Газовые гидраты — энергия будущего»**

Компьютерная верстка и дизайн: К.И. Михайленко  
Оригинал-макет изготовлен в  
Институте механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Подписано в печать 14.06.2017  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Computer Modern». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 8,4.  
Тираж 100 экз. Заказ № 24

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленного электронного оригинал-макета  
в типографии ООО «Нефтегазовое дело»  
E-mail: orient4@mail.ru