На правах рукописи



Моренко Ирина Вениаминовна

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в Институте механики и машиностроения – структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Научный консультант:	**Федяев Владимир Леонидович**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИММ – структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН.
Официальные оппоненты:	**Лаптев Анатолий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.
	Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь.
	Пахомов Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник ФГБУН Института теплофизики им. С.С Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Уфа.

Защита состоится «5» февраля 2027 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.11, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат просим направлять ученому секретарю совета по указанному выше адресу и на e-mail: raykovAA@corp.knrtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=597355.

Автореферат разослан «____»_____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.11,
кандидат технических наук, доцент А.А. Райков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Нефтехимическая отрасль считается высокотехнологичной и наукоемкой, поскольку организация сложных многоступенчатых процессов переработки исходного углеводородного сырья, промежуточных продуктов базируется на новейших результатах теоретических и экспериментальных исследований, практических разработках в области химии, гидроаэродинамики, тепломассообмена, материаловедения. Теоретические исследования, выполненные в рамках темы диссертации, направлены на анализ недостаточно изученных взаимосвязанных гидроаэродинамических и теплообменных процессов, протекающих в многокомпонентных средах при реализации ключевых производственных стадий в теплотехнических установках, барботажных устройствах, при реализации имплозионной технологии, других случаях, когда рабочие среды являются многофазными. При анализе процессов, на которых базируются современные технологии, возникает необходимость решения ряда задач механики многофазных систем: снижения гидродинамического сопротивления тел, находящихся в потоке; интенсификации теплообмена; оценки влияния примесей на структуру течения, гидродинамическое сопротивление и теплоотдачу тел; определения особенностей течения в пористых средах; взаимодействия всплывающих пузырьков в вязкой жидкости; движения сред с границами раздела фаз; улучшения коллекторских свойств прискваженных зон продуктивных пластов. Возникают также проблемы экологии, в частности, снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Перспективы дальнейшего развития нефтехимической отрасли определяются комплексом стратегических, технологических, экономических и других факторов. При этом необходимо разработать достаточно точные математические модели движения многофазных систем, теплообмена; установить новые закономерности, определить рациональные режимные параметры функционирования установок, внедрить научно обоснованные технические решения, направленные на повышение эффективности их работы при многостадийной переработке нефти, нефтепродуктов и газа.

Работа проведена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН по темам: «Развитие динамики многофазных сред, аэрогидроупругих систем и механики оболочек с приложениями в машиностроении и нефтедобыче» № 121021800126-4 (2021-2023 гг.), «Развитие механики многофазных и аэрогидроупругих систем, оболочечных конструкций с приложениями в машиностроении и нефтедобыче» № 124060500016-7 (2024-2026 гг.), в рамках целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по теме «Разработка высокоэффективных способов очистки жидких сред от примесей и предотвращения выбросов паров в атмосферу на основе математического моделирования и оптимизации», по программе ОЭММПУ РАН (IV.4.10)

«Фундаментальные проблемы физической и химической механики для экспериментов на МКС» (2015-2017 гг.).

Степень разработанности. Динамика многофазных сред является быстроразвивающимся направлением механики. В силу своей распространенности многофазные многокомпонентные системы стали объектом изучения большого числа российских и зарубежных ученых. Значительный вклад в развитие механики многофазных сред внесли: С.Г. Телетов, Г. Уоллис, Х.А. Рахматулин, Р.И. Нигматулин, А.Ю. Вараксин, С.С. Кутателадзе, А.Н. Крайко, В.Г. Левич, У.Г. Пирумов, Л.Е. Стернин, А.А. Шрайбер, Л.И. Зайчик, И.А. Попов, А.Л. Тукмаков, Ф.Г. Ахмадиев, К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, Д.А. Губайдуллин, М.Е. Дейч, А.А. Губайдуллин, А.Л. Стасенко, В.А. Архипов, В.Я. Рудяк, В.И. Терехов, М.А. Пахомов, Ю.В. Великанова, Т.П. Любимова, А.Г. Лаптев, Ш.Х. Зарипов, Д.А. Лабунцов, В.В. Глазков, S. Sou, R. Clift, M.E. Weber, R. Boothroyd, C.T. Crowe, G.H. Yeoh, C.E. Brennen, W. Sirignano, N.I. Kolev, M. Ishii и другие. Несмотря на имеющийся обширный накопленный материал по механике многофазных сред многие аспекты остаются малоизученными. Как в части построения новых математических моделей, описывающих сложные явления, протекающие в многофазных средах, так и объяснения механизмов ряда возникающих эффектов, а также при разработке новых технологий, поиске технических решений при конструировании устройств, установок; повышении эффективности их работы.

Объектами исследования диссертационной работы являются технические системы, процессы гидроаэродинамики и теплообмена, протекающие в технологических установках нефтехимической отрасли.

Предмет исследования – нестационарное течение вязкой жидкости, движение многофазных сред в условиях неизотермичности, особенности теплоотдачи на поверхности обтекаемых тел при реализации различных способов воздействия на них в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Целью диссертационной работы является развитие теоретических основ гидроаэродинамических и тепловых процессов, протекающих в технологических установках нефтехимической отрасли, с использованием математических моделей динамики многофазных систем и численных методов, направленных на установление закономерностей при отыскании рациональных конструктивных параметров, технологических режимов установок, обосновании новых технических решений.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи.**

1. Анализ современного состояния исследований многофазных и многокомпонентных сред применительно к современным техническим объектам и технологическим процессам нефтехимической отрасли, основными в которых являются теплообмен, сепарация, напыление, барботаж.

2. Математическое моделирование движения дисперсных смесей, стратифицированных течений, а также процессов теплопереноса с использованием эйлерово-лагранжева и эйлерово-эйлерова подходов, учета в математических моделях взаимодействия фаз, частиц со стенками, описания движения сред в пористом проницаемом слое, выбор модели турбулентности.
3. Исследование влияния на структуру потока, интегральные гидродинамические и тепловые характеристики направленного вращения с постоянной скоростью находящихся в потоке вязкой жидкости цилиндрических тел, вынужденных вращательных колебаний их, изменения интенсивности турбулентности набегающего потока, расположения тел в потоке тандемом, нанесения на поверхность пористого проницаемого слоя с разными теплофизическими свойствами, добавления в поток частиц примеси, капель.
4. Анализ работы инерционных улавливающих устройств: каплеуловителей жалюзийного типа, применяемых в градирнях, и сетчатых демистеров. Поиск новых эффективных форм лопаток жалюзийных каплеуловителей, рациональных режимов сепарации капель.
5. Исследование динамики всплытия пузырьков в покоящейся вязкой жидкости в поле силы тяжести, оценка влияния начальной формы пузырьков на скорость их подъема, механизмы взаимодействия пузырьков в процессе всплытия при барботаже.
6. Разработка трехмерной математической модели распространения волн давления в жидкости вследствие схлопывания сферической газовой полости, имплозионного процесса в обсадной колонне вертикальной скважины. Анализ влияния начального давления газа, радиуса полости на основные параметры имплозионного процесса. Оценка высоты имплозионного устройства при гидроимпульсном воздействии на призабойную зону пласта.

Методология и методы исследования. Методология работы состоит в том, что она базируется на фундаментальных законах механики, теплофизики, при этом используются методы математического моделирования, вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). Применение методов CFD позволяет получить данные о физических процессах, показатели которых не всегда можно измерить в натурных или лабораторных экспериментах, иногда это опасно или сопряжено со значительными техническими трудностями. Кроме того, методы CFD дают возможность уменьшить стоимость и сократить время разработки новых установок, технологий, модернизации имеющихся, оптимизации их конструкторских и технологических параметров.

Система уравнений, описывающая нестационарное неизотермическое течение вязкой жидкости, движение многофазных сред представляется в

двухмерной или трехмерной постановке. Решение соответствующих краевых задач осуществляется методом конечных объемов.

Научная новизна. Получен ряд новых результатов, закономерностей, важных для развития динамики многофазных сред, практических приложений.

1. В случае поперечного обтекания вязкой жидкостью одиночного цилиндра найдены скорости вращения вокруг оси, частота и амплитуда вращательных колебаний цилиндра, межцентровое расстояние при размещении тел тандемом, при которых снижается гидродинамическое сопротивление тела, амплитуда подъемной силы, что способствует уменьшению вибраций и шумов при эксплуатации оборудования. Повышение интенсивности турбулентности набегающего потока приводит к подавлению дорожки Кармана в следе за цилиндром, монотонному росту теплоотдачи его поверхности. Обнаружено, что в случае обтекания вязкой жидкостью цилиндрического тела с пористым слоем при увеличении его проницаемости точка отрыва потока смещается с внешней границы слоя на поверхность тела. Определена степень влияния теплофизических свойств материала пористого слоя на теплоотдачу поверхности. Установлены аппроксимационные зависимости коэффициентов сопротивления, подъемной силы и числа Нуссельта цилиндра от определяющих параметров.
2. Показано существование различий в структуре гидродинамического следа за обтекаемым цилиндром в зависимости от условий подачи твердых частиц в поток: формирование кластеров частиц в вихревых структурах, периодические области без частиц, подавление дорожки Кармана. По сравнению со случаем поперечного обтекания тела однородной вязкой жидкостью наличие в потоке твердых частиц увеличивает коэффициент сопротивления труб, препятствий цилиндрической формы в рабочем пространстве теплоэнергетических установок, уменьшает амплитуду коэффициента подъемной силы, интенсифицирует теплоотдачу, степень влияния зависит от массовой концентрации частиц, теплофизических свойств, числа Стокса. Предложена новая форма лопаток инерционных каплеуловителей жалюзийного типа, критерий оценки эффективности лопаток. Выявлено, что переход к нестационарному режиму обдувания прутков сетчатого демистера сопровождается образованием микроструй, за счет этого повышается эффективность сепарации капель воды.
3. Установлено, что взаимодействие газовых полостей в процессе всплытия при барботаже определяется расстоянием между пузырьками, распределением поля скорости окружающей жидкости и взаимным влиянием вихревых структур гидродинамических следов.
4. Разработана трехмерная математическая модель имплозионного процесса, которая позволяет получить данные о схлопывании газовой полости в жидкости, возникновении и последующем распространении

волн давления, изменении температуры среды, трансформации формы полости, скорости движения границы газ-жидкость.

5. В случае схлопывания сферической газовой полости в жидкости, инициированного перепадом давления в средах, получены новые данные о распространении волн разрежения и сжатия, установлено влияние радиуса полости и давления газа в начальный момент времени на максимальное давление в жидкости, скорость движения межфазной поверхности.
6. При исследовании волновых процессов в обсадной колонне нефтедобывающих скважин установлено, что увеличение высоты имплозионной камеры повышает эффективность гидроимпульсного метода воздействия на призабойную зону пласта за счет увеличения длительности процесса.

Теоретическая значимость результатов исследований связана с выявлением условий и режимов, при которых снижается гидродинамическое сопротивление тел, размещенных в потоке, уменьшается амплитуда колебаний подъемной силы, создаются условия для интенсификации теплоотдачи или, наоборот, уменьшения ее. Получены данные о влиянии частиц примеси в несущей среде на структуру течения, гидродинамическое сопротивление тел, размещенных в потоке, изменение теплоотдачи поверхности. Результаты решения задач об обтекании тел неоднородной средой, о движении газовых полостей в жидкости и их гидродинамическом взаимодействии являются вкладом в развитие механики многофазных систем, способствуют более глубокому пониманию процессов, происходящих в них, могут служить теоретической основой для разработки современных технических устройств, технологий.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в возможности использования их при решении проблем уменьшения гидродинамического сопротивления, изменения параметров теплоотдачи поверхности тел, размещенных в потоке вязкой жидкости, разработки соответствующих практических рекомендаций. Практическое использование результатов диссертационной работы подтверждается справками о внедрении ПИ «Союзхимпромпроект», ОАО «ВНИПИэнергопром», ООО «Полимерхолодтехника», ООО «Водопад», НОЦ «Центр композитных технологий» КНИТУ-КАИ, ООО «ВСТ-Реконструкция». На основе полученных данных предложены эффективные технические решения по реконструкции вентиляторных градирен СК-1200, СК-400, ВГ-70, а также башенных, широко применяемых в теплоэнергетике. Выработаны рекомендации по выбору геометрических и режимных параметров инерционных каплеуловителей жалюзийного и сетчатого типа. Предложена новая форма лопаток каплеуловителей. Полученные новые данные о механизмах взаимодействия газовых полостей в жидкости дают возможность рационального выбора технологических режимов работы оборудования с многофазными рабочими средами, теплотехнологических

установок, аппаратов химической технологии, в частности, барботажных фильтров, барботажных реакторов, устройств для очистки сред от механических примесей, капель жидкости. Результаты моделирования имплозионного процесса в вертикальной нефтедобывающей скважине позволяют оценить необходимую высоту камеры низкого давления. Как следствие, данные рекомендации способствуют повышению качества выпускаемой продукции, экономии материалов и энергоресурсов, будут полезны при разработке новых технологий, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Личный вклад автора. Работа является обобщением многолетних исследований автора в области численного моделирования нестационарных гидродинамических и теплообменных процессов, протекающих в многофазных средах, применительно к технологическим установкам. Научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем лично. Соискатель лично проводил исследования, все вычислительные эксперименты, интерпретацию и анализ полученных результатов, сформулировал выводы. На основе полученных результатов автором данной работы были подготовлены выступления на конференциях, публикации в рейтинговых журналах. Они опубликованы автором лично и в соавторстве. В публикациях в соавторстве с чл.-корр. РАН Д.А. Губайдуллиным, д.т.н., профессором В.Л. Федяевым, д.т.н. Б.А. Снигеревым, к.ф.-м.н. Ю.А. Волковым личный вклад автора заключается в разработке ряда математических моделей, методик расчетов, проведении тестовых расчетов, вычислительных экспериментов, анализе полученных результатов, получении аппроксимационных зависимостей, представлении практических рекомендаций. В совместных публикациях с д.ф.-м.н., профессором А.Б. Мазо автору принадлежат проведение тестовых расчетов, вычислительных экспериментов и анализ полученных данных.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Структура течения, зависимости коэффициента сопротивления, подъемной силы и числа Нуссельта обтекаемых вязкой жидкостью тел в рабочем пространстве технологических установок от основных параметров, характеризующих вращение кругового цилиндра с постоянной скоростью вокруг оси, вынужденные вращательные колебания, изменение интенсивности турбулентности набегающего потока, размещение тел в потоке тандемом, наличие на поверхности тела пористого проницаемого слоя.
2. Оценки влияния физических свойств подаваемых в поток вязкой несжимаемой жидкости частиц дисперсной фазы, их размеров на гидродинамическое сопротивление, подъемную силу и конвективный теплообмен поперечно обтекаемых цилиндрических тел; геометрических и режимных параметров каплеуловителей жалюзийного типа, сетчатых демистеров на эффективность инерционного улавливания капель воды.

3. Влияние формы пузырьков в начальный момент времени на скорость подъема, механизмы взаимодействия пузырьков при барботаже.
4. Трехмерная математическая модель, описывающая динамику имплозионного процесса, включающего схлопывание газовой полости в жидкости и последующего распространения волн давления. Особенности распространения волн сжатия и разрежения в средах, влияние радиуса полости и давления газа в начальный момент времени на максимальное давление в жидкости, скорость движения межфазной поверхности.
5. Результаты математического моделирования имплозионного процесса в обсадной колонне скважины, инициированного перепадом давления в камере низкого давления и окружающей ее скважинной жидкости, влияние высоты имплозионной камеры на генерируемые волны разрежения и сжатия в колонне на уровне призабойной зоны пласта.

Степень достоверности научных результатов. Математические модели для описания нестационарного движения вязкой жидкости базируются на фундаментальных законах механики, теплофизики. Выполнена верификация программ и алгоритмов численного решения соответствующих систем дифференциальных уравнений. Проверена сеточная сходимость метода путем решения задач на последовательности сгущающихся сеток. Показано хорошее согласие результатов расчета ряда модельных задач с известными экспериментальными данными, численными и аналитическими решениями других авторов. В целом полученные результаты согласуются с имеющимися физическими представлениями. Результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в рецензируемых российских и международных журналах, обсуждались на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: Second International Summer Scientific School «High Speed Hydrodynamics» (Cheboksary, 2004); XVII Международной школе по моделям механики сплошной среды (Казань, 2004); XV Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2007) (Алушта, 2007); Международной научной конференции «Гидродинамика. Механика. Энергетические установки» (к 145-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова) (Чебоксары, 2008); Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016); III Международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2008); Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009» «АНТЭ-2011» «АНТЭ-2015» (Казань, 2009, 2011, 2015); VI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2011); X Международной Четаевской

конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» (Казань, 2012); 16th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR (Kazan, 2012); Международной научной конференции «Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение», посвященная 150-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова (Чебоксары, 2013); Всероссийской научной конференции «Обратные краевые задачи и их приложения» (Казань, 2014); Научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (Казань, 2014, 2017, 2018, 2019, 2025); Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды» (Казань, 2020, 2025); Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (МНТК «ИМТОМ-2014»). (МНТК «ИМТОМ-2015») (МНТК «ИМТОМ-2016») (МНТК «ИМТОМ-2017»), (МНТК «ИМТОМ-2022») (Казань, 2014, 2015, 2016, 2017, 2022); Итоговых научных конференциях ФИЦ КазНЦ РАН.

По результатам исследований опубликовано 64 работы, в том числе 27 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по следующим пунктам:

п. 3. Гидравлические модели и методы расчета течений в водоемах, технологических устройствах и энергетических установках;

п. 7. Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии);

п. 8. Течение жидкостей и газов в пористых средах;

п. 16. Тепломассоперенос в газах и жидкостях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов исследований, приведены сведения об их апробации, публикациях, структуре и объеме работы.

В работе развиты теоретические основы гидроаэродинамических и тепловых процессов, протекающих в реальных технологических установках нефтехимической отрасли, практически во всех случаях рабочие среды являются гетерогенными (многокомпонентными, многофазными). Для исследования данных процессов используется метод математического моделирования динамики многофазных сред, все сформулированные задачи решаются методом конечных объемов. Во всех задачах выявленные особенности, установленные закономерности, имеющие большую научную и практическую значимость, легли в основу технических решений по

повышению эффективности работы технических объектов и технологических процессов, часть которых реализована на практике.

В первой главе выделены технологии, технологические процессы, установки и аппараты нефтехимической отрасли, в которых рабочими являются многофазные среды. В частности, движение многокомпонентных сред имеет место в теплотехнических установках, теплообменных аппаратах, при перемешивании, разделении фаз, напылении, нефтедобыче. Приведены схемы и описаны принципы работы рекуперативных и регенеративных теплообменников, градирен, барботажных фильтров, распылительных устройств, вертикальной нефтедобывающей скважины. Названы актуальные задачи механики многофазных систем, такие как снижение гидродинамического сопротивления тел, находящихся в потоке, интенсификация теплообмена, сообщение потоку вращательного движения, течение в пористых средах, изменение формы пузырьков, изучение механизмов взаимодействия пузырьков при движении их в вязкой жидкости, движение сред с границами раздела фаз. Освещены вопросы снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Представлен обзор современного состояния исследований в области динамики многофазных сред. Сформулированы основные проблемы математического моделирования процессов, протекающих при движении многокомпонентных систем.

Отмечено, что возрастающие требования к эффективности современного оборудования нефтехимической и других отраслей промышленности, оптимизации их геометрических и режимных параметров, оценке условий надежности и безопасности технологий способствуют проведению фундаментальных и прикладных исследований динамики многофазных сред, направленных на расширение базы знаний, получение более точных данных, установление критериальных зависимостей, выявление особенностей рассматриваемых процессов.

Во второй главе изложены общие принципы математического описания динамики многофазных сред, которые используются при последующей постановке соответствующих задач, решении конкретных прикладных проблем. Отмечается, что большое разнообразие типов течений, возникающих эффектов, многопараметричность и многомасштабность процессов делают общее математическое описание практически невозможным. В работе используется как эйлерово-лагранжев, так и эйлерово-эйлеров подходы. Выбор подхода определяется набором параметров, которые необходимо оценить и проанализировать для достаточно точного описания физических процессов, режимов течения, основных особенностей реальных явлений. Безусловным преимуществом эйлерово-лагранжева подхода является получение детальной информации о траекториях отдельных частиц, применимость в случаях, когда направление движения несущей фазы и частиц не совпадают.

Основными уравнениями, описывающими нестационарное ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости, являются уравнение неразрывности, количества движения и энергии

$$\nabla\cdot\left(\rho\boldsymbol{u}\right)=0, \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\rho\left(\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+\rho\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F}_p, \tag{2}$$

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho c_p\left(\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)T=\nabla\cdot\left(\lambda\nabla T\right)+Q_p. \tag{3}$$

Здесь $\boldsymbol{u}$ – вектор скорости жидкости, t – время, p – давление, ρ – плотность, λ – теплопроводность жидкости, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\boldsymbol{g}$ – ускорение свободного падения, $\boldsymbol{F}_p$ – источниковый член, учитывающий влияние дисперсных частиц на несущую фазу, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений, T – температура, Q_p – осредненный по объему тепловой поток, обусловленный частицами примеси.

Нестационарное турбулентное движение вязкой жидкости описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса, энергии

$$\nabla\cdot\left(\rho\overline{\boldsymbol{u}}\right)=0, \tag{4}$$

$$\rho\frac{\partial\overline{\boldsymbol{u}}}{\partial t}+\rho\left(\overline{\boldsymbol{u}}\cdot\nabla\right)\overline{\boldsymbol{u}}=-\nabla\overline{p}+\nabla\cdot\left(\tau+\tau^T\right)+\rho\boldsymbol{g}+\overline{\boldsymbol{F}}_p, \tag{5}$$

$$\rho c_p\frac{\partial\overline{T}}{\partial t}+\rho c_p\left(\overline{\boldsymbol{u}}\cdot\nabla\right)\overline{T}=\nabla\cdot\left(\lambda_{eff}\nabla\overline{T}\right)+\overline{Q}_p. \tag{6}$$

Здесь $\overline{\boldsymbol{u}}$, $\overline{p}$, $\overline{T}$ – осредненные по Рейнольдсу вектор скорости, давление, температура, τ^T – тензор рейнольдсовых напряжений, λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности. Для замыкания уравнений (4)-(6) выбирается модель Ментера SST, которая хорошо предсказывает свойства свободных сдвиговых течений и пристенной турбулентности.

В рамках лагранжева подхода траектория движения частицы в локальной декартовой системе координат xyz описывается уравнениями

$$\frac{dx}{dt}=u_{p,x},\ \frac{dy}{dt}=u_{p,y},\ \frac{dz}{dt}=u_{p,z}, \tag{7}$$

где $u_{p,x}$, $u_{p,y}$, $u_{p,z}$ – проекции вектора скорости $\boldsymbol{u}_p$ частицы на оси координат. Уравнение движения одиночной i-ой частицы дисперсной фазы с учетом сил гидродинамического сопротивления частицы $\boldsymbol{F}_D$, тяжести $\boldsymbol{F}_g$ и уравнение теплового баланса частицы имеют вид:

$$m_p\frac{d\boldsymbol{u}_p}{dt}=\boldsymbol{F}_D+\boldsymbol{F}_g,\ \ m_pc_{p,p}\frac{dT_p}{dt}=\pi d_p\lambda\mathrm{Nu}_p\left(T-T_p\right), \tag{8}$$

где d_p, m_p, T_p – диаметр, масса, температура частицы, $c_{p,p}$ – удельная теплоемкость материала частиц. Интенсивность теплообмена между

поверхностью частицы дисперсной фазы с несущей фазой характеризует число Нуссельта Nu_p. Освещены возможности учета взаимного влияния дисперсной и дисперсионной фаз, взаимодействия частиц между собой. Рассмотрены силы, действующие на частицы при их движении в вязкой жидкости, модели взаимодействия частиц со стенкой; движение жидкости в пористом проницаемом слое.

Для описания технологических процессов, в которых имеет место совместное движение двух несмешивающихся фаз, используется эйлерово-эйлеров подход, представленный в работе моделью Volume of Fluid (VOF).

Основные уравнения дополняются начальными и граничными условиями. Все сформулированные в работе гидродинамические задачи решаются методом конечных объемов, реализованным в программном комплексе OpenFOAM. Расчетная область покрывается сеткой со сгущением узлов к обтекаемым поверхностям для разрешения пограничных слоев и в области больших градиентов решения. Дифференциальные уравнения интегрируются по каждому контрольному объему, в соответствие с теоремой Гаусса-Остроградского осуществляется переход от объемных интегралов к интегралам по поверхности объема для получения конечно-разностного аналога. Искомые дискретные значения отыскиваются в центрах контрольных объемов. Для дискретизации градиента искомой величины, конвективного, диффузионного и источникового членов применяются разностные схемы первого и второго порядка точности. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решаются известными итерационными методами: геометро-алгебраическим многосеточным методом (GAMG), методом би-сопряженных градиентов с предобуславливанием (PBiCG), методом релаксации (smoothSolver). В приближении несжимаемой жидкости для связывания полей скорости и давления используется процедура PIMPLE. Выбор метода конечных объемов для численного решения обусловлен тем, что он обладает свойством консервативности и применим для областей со сложной геометрией, дискретизированными как структурированными, так и неструктурированными сетками.

В последующих главах демонстрируются результаты применения общего подхода для решения ряда технологических, технических проблем нефтехимической отрасли, нефтедобычи, названных в первой главе, путем анализа полученных результатов многовариантных параметрических расчетов, установления новых закономерностей; разрабатываются предложения по повышению эффективности технологических процессов.

Третья глава посвящена оценке влияния различных факторов при обтекании препятствий, размещенных в рабочем пространстве технологических установок с целью снижения гидродинамического сопротивления, интенсификации теплоотдачи. Хотя на практике поперечное обтекание труб как элементов теплообменников, происходит в стесненных условиях, тем не менее, изучение влияния внешних факторов на гидродинамику и теплоотдачу поверхности одиночного цилиндра является

той фундаментальной базой, на которой строятся инженерные расчетные формулы, включающие корреляции для одиночного цилиндра с поправочными коэффициентами, учитывающими взаимное расположение труб, загромождение, другие факторы. С использованием методов вычислительной гидродинамики исследуются такие механизмы взаимодействия тел со средой, как вращение цилиндрических тел с постоянной скоростью вокруг оси в потоке вязкой жидкости, вынужденные вращательные колебания тела, изменение интенсивности турбулентности набегающего потока, размещение тел в потоке тандемом. Нестационарное движение вязкой несжимаемой жидкости в ламинарном режиме описывается уравнениями (1)-(3). В случае турбулентного режима течения для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений (4)-(6) используется модель турбулентности Ментера SST.

Для проведения тестовых расчетов выбирается модельная задача поперечного обтекания вязкой жидкостью кругового цилиндра. Выполняется валидация математической модели и верификация численных методов решения задачи, проверяется сеточная сходимость. Результаты расчетов картины течения, коэффициента сопротивления цилиндра $C_D = F_D / 0.5\rho u_\infty^2 Dl$, подъемной силы $C_L = F_L / 0.5\rho u_\infty^2 Dl$, среднего по поверхности тела числа Нуссельта $\overline{\mathrm{Nu}} = \overline{\alpha} D / \lambda$, характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными других авторов. Здесь F_D – сила сопротивления, F_L – подъемная сила, u_∞ – скорость набегающего потока жидкости, D, l – диаметр, длина цилиндра, ρ – плотность жидкости, $\overline{\alpha}$ – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи, λ – коэффициент теплопроводности жидкости.

Численное исследование *поперечного обтекания вращающегося цилиндра с постоянной безразмерной скоростью* $\alpha_\omega = v_0 / u_\infty$ (v_0 – линейная скорость вращения поверхности, u_∞ – скорость набегающего потока) показало, что существуют критические безразмерные скорости вращения поверхности цилиндра, при которых характер течения жидкости в следе меняется. *При ламинарном режиме течения,* (число Рейнольдса $\mathrm{Re} = u_\infty D / \nu$=200, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости) в интервалах $2.0 < \alpha_\omega < 4.3$, $\alpha_\omega > 4.9$ неустойчивость потока исчезает, обтекание становится квазистационарным. В случае обтекания вращающегося цилиндра *турбулентным потоком* ($\mathrm{Re} = 4 \cdot 10^4$) затухание колебаний коэффициента подъемной силы и стационарная картина течения наблюдаются лишь при изменении α_ω в диапазоне $2.0 < \alpha_\omega < 3.9$.

На рис. 1 а показано монотонное увеличение среднего коэффициента подъемной силы с ростом скорости вращения цилиндрической поверхности. При $\alpha_\omega > 3.9$ средний коэффициент подъемной силы цилиндра $\left|\overline{C}_L\right|$ в случае обтекания его турбулентным потоком возрастает, но не столь интенсивно,

как в случае ламинарного режима. Минимальные значения среднего по времени коэффициента сопротивления цилиндра $\overline{C}_D$ достигаются, когда обтекание тела происходит в квазистационарном режиме (рис. 1 б).

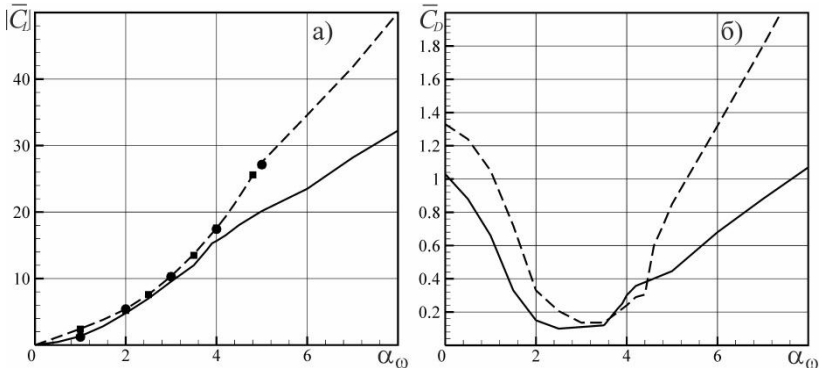


Рис. 1. Зависимость модуля среднего по времени коэффициента подъемной силы цилиндра (а) и среднего коэффициента сопротивления цилиндра (б) от безразмерной скорости вращения: пунктирная линия – ламинарный режим (Re=200), сплошная линия – турбулентный режим ($\mathrm{Re} = 4 \cdot 10^4$); ● – данные Al-Maliky R.F. (2013), ■ – Mittal S. et al. (2003) (Re=200)

При вращении цилиндра в ламинарном потоке слои жидкости увлекаются поверхностью, создавая между нагретой поверхностью цилиндра и свободным потоком буферную область, толщина которой возрастает с увеличением скорости α_ω. Ламинарный пограничный слой обладает значительным термическим сопротивлением. В результате теплообмен тела с окружающей средой, в целом, уменьшается с ростом скорости вращения (рис. 2 а). Однако если течение жидкости происходит в турбулентном режи-

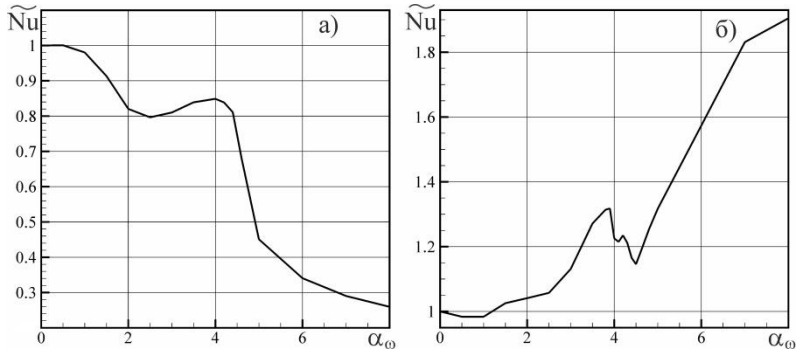


Рис. 2. Зависимость относительного числа Нуссельта цилиндра от скорости вращения поверхности в ламинарном потоке при Re=200 (а), в турбулентном потоке при $\mathrm{Re} = 4 \cdot 10^4$ (б), число Прандтля Pr=0.74

ме, пограничный слой на поверхности цилиндра истончается, частицы жидкости движутся неупорядоченно и хаотически, то перемешивание жидкости вызывает интенсификацию процессов теплообмена (рис. 2 б). Обнаружено, что немонотонность зависимости числа Нуссельта от скорости вращения цилиндра как в ламинарном, так и турбулентном режимах

обусловлена изменением характера течения от колебательного к квазистационарному и наоборот.

Гидродинамические характеристики кругового цилиндра при его поперечном обтекании вязкой несжимаемой жидкостью существенно меняются, если *цилиндр совершает вынужденные вращательные колебания*. В ходе численных экспериментов варьируются значения безразмерных параметров: амплитуда угловой скорости вращения цилиндра $\alpha_\varphi = DA/2u_\infty$ от 0.25 до 5.50 и частота вынужденных колебаний $f = f^*/f_0$ от 1.0 до 10.0. Здесь A – амплитуда колебаний угловой скорости вращения цилиндра, f^* – частота, f_0 – частота отрыва вихрей от поверхности неподвижного цилиндра при соответствующем числе Рейнольдса в случае обтекания его вязкой несжимаемой жидкостью. В результате проведения серии численных экспериментов при Re=200 показано, что для каждой частоты f существует свое значение амплитуды α_φ, при котором величина $\overline{C}_D/\overline{C}_{D0}$ достигает минимума. Путем реализации гармонических поворотных колебаний цилиндрического тела при $\alpha_\varphi = 4,\ f = 4$ можно уменьшить его гидродинамическое сопротивление на 32% по сравнению со случаем обтекания неподвижного цилиндра.

Известно, что один из основных способов интенсификации теплообмена на поверхности обтекаемых тел – *турбулизация* набегающего потока. При этом теплоотдача нагретого тела зависит от чисел Рейнольдса, Прантдля, интенсивности турбулентности $\mathrm{Tu} \equiv \sqrt{\overline{u'^2}}/u_{avg}$, измеряемой в %, линейного масштаба турбулентных вихревых структур $\overline{L}_f$, других факторов. Здесь u' – пульсации скорости, u_{avg} – локальная средняя скорость жидкости. С ростом интенсивности турбулентности Tu^*, рассчитанной непосредственно перед телом, амплитуда C_L^* коэффициента подъемной силы C_L уменьшается по закону, близкому к линейному (рис. 3 а), что означает подавление дорожки Кармана. При $\mathrm{Tu}^* \approx 14\%$ амплитуда C_L^* близка к нулю и при Tu^*=16% дорожка Кармана за телом отсутствует. Показано также, что среднее по поверхности цилиндра число Нуссельта $\overline{\mathrm{Nu}}$ с ростом Tu^* увеличивается (рис. 3 б), причем при Tu^*>2.5% по линейному закону:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 231.5 + 2.5\mathrm{Tu}^* \text{ при } \mathrm{Re} = 4 \cdot 10^4.$$

В целом, при изменении интенсивности турбулентности Tu^* от 1.0% до 16% число Нуссельта $\overline{\mathrm{Nu}}$ возрастает на 17%.

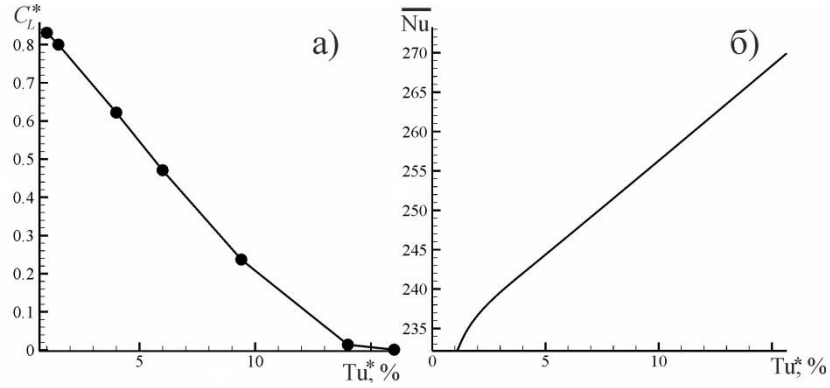


Рис. 3. Зависимость амплитуды коэффициента подъемной силы (а), среднего числа Нуссельта (б) от интенсивности турбулентности Tu^* при $\mathrm{Re} = 4 \cdot 10^4$, Pr=0.74

Изменение гидродинамических характеристик обтекаемых тел возникает и в случае расположения их в потоке *тандемом* друг за другом. Рассматриваются ламинарный ($\mathrm{Re} \sim 10^2$) и турбулентный ($\mathrm{Re} \sim 10^4$) режимы обтекания. Расчетным путем подтверждено, что для любого числа Рейнольдса существует безразмерное отнесенное к диаметру критическое расстояние между цилиндрами G^*, которое разделяет два принципиально разных режима течения. Докритический режим обтекания реализуется при $G < G^*$, в этом случае между двумя цилиндрами формируется пара замкнутых квазистационарных вихревых зон (рис. 4 а), ограниченных двумя линиями тока, проходящими от точек отрыва потока на первом цилиндре до точек присоединения на втором. Периодический сход вихрей в докритическом режиме может происходить только со второго тела. При переходе через точку $G = G^*$ квазистационарное обтекание тандема переходит в автоколебательный режим с периодическим срывом вихревых сгустков с поверхности каждого цилиндра и образованием в следе дорожки Кармана (рис. 4 б). Коэффициенты сопротивления $\overline{C}_D$ и амплитуды изменения подъемной силы резко возрастают при $G > G^*$, величина $\overline{C}_D$ второго цилиндра меняет знак с отрицательного в докритической области на положительный, скачком возрастает число Струхаля.

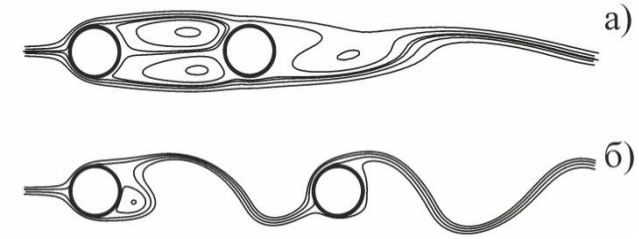


Рис. 4. Линии тока в докритическом (G=6) (а) и посткритическом режиме (G =10) (б) при Re=200

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования неизотермического поперечного обтекания вязкой несжимаемой жидкостью (водой) цилиндрических тел, покрытых пористым проницаемым слоем при умеренных числах Рейнольдса. Предполагается, что материал проницаемого слоя имеет корпускулярную структуру, пористость ε и проницаемость κ связаны соотношением Козени-Кармана. Фильтрация описывается законом Форхгеймера, который учитывает инерционные эффекты. Толщина пористого проницаемого слоя равна $0.1\,D$. В ходе численных экспериментов число Дарси $\mathrm{Da} = \kappa / (0.1D)^2$ меняется в диапазоне $10^{-4} \le \mathrm{Da} \le 1$. Рассматривается два вида материала пористого слоя: материал с высоким коэффициентом теплопроводности λ_s =202.4 Вт/(м·К), удельной теплоемкостью при постоянном давлении $c_{p,s}$ =871 Дж/(кг·К); теплоизоляционный материал с низким коэффициентом теплопроводности (λ_s =0.05 Вт/(м·К), $c_{p,s}$ =856 Дж/(кг·К)). Наличие пористого проницаемого слоя на поверхности обтекаемого вязкой жидкостью кругового цилиндра существенно влияет на характер течения жидкости, его теплообмен. Добавляется движение и теплообмен жидкости в пористом слое покрытия, усложняется характер течения за кормой, смещаются точки отрыва потока от поверхности. Так, при малой проницаемости покрытия ($\mathrm{Da} = 10^{-4}$) отрыв потока происходит с поверхности слоя (рис. 5 а снизу), в то время как при большой проницаемости ($\mathrm{Da} = 1$) отрыв потока осуществляется с поверхности ядра, вихревая область частично находится внутри проницаемого слоя (рис. 5 а сверху). Проницаемое покрытие на поверхности обтекаемого вязкой жидкостью кругового цилиндра сокращает длину вихревой области за телом (рис. 5 б).

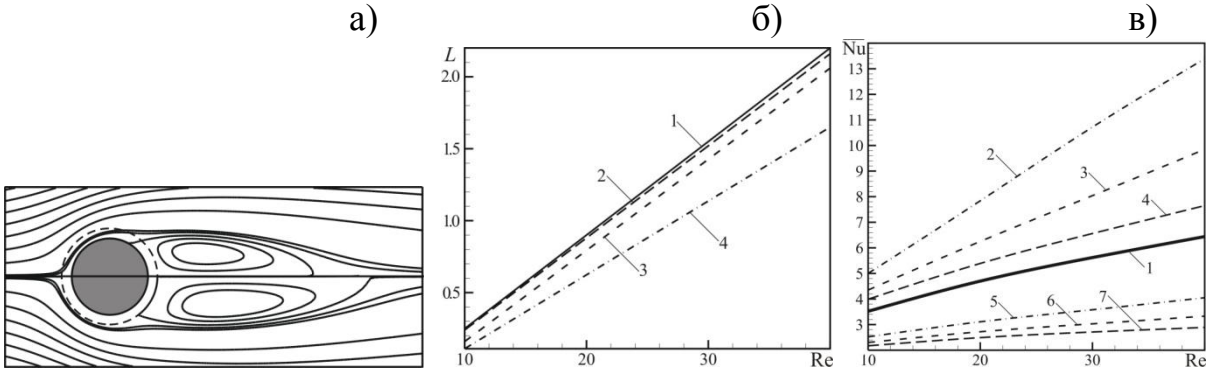


Рис. 5. Линии тока при Re=40; сверху – Da=1, снизу – Da=10^{-4} (а); безразмерная длина вихревого следа: 1 – за непроницаемым цилиндром; за цилиндром с проницаемым слоем: 2 – $\mathrm{Da} = 10^{-2}$, 3 – 10^{-1}, 4 – 1 (б); зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса: 1 – ядра без слоя; ядра, покрытого пористым слоем из высокотеплопроводного материала: 2 – Da=1, 3 – 10^{-1}, 4 – 10^{-4}; из теплоизоляционного материала: 5 – Da=1, 6 – 10^{-1}, 7 – 10^{-4} (в)

Высокая теплопроводность материала покрытия способствует интенсификации теплообмена на 13–100%, а теплоизоляционного – уменьшению теплоотдачи на 28–55% в зависимости от чисел Рейнольдса и Дарси при указанных теплофизических характеристиках материалов (рис. 5 в).

В случае поперечного обтекания вязкой жидкостью цилиндрического тела с квадратным поперечным сечением со стороной b, покрытого пористым проницаемым слоем толщиной $0.5b$ из высокотеплопроводного материала, наибольшая теплоотдача наблюдается на фронтальной стороне, в области углов обтекаемого цилиндра. Получена зависимость для среднего числа Нуссельта $\overline{\mathrm{Nu}}$ цилиндра с квадратным поперечным сечением ($5 \le \mathrm{Re} \le 40$, $1.6 \cdot 10^{-5} \le \mathrm{Da} \le 1.6 \cdot 10^{-1}$, Pr=0.74):

$$\overline{\mathrm{Nu}} = \left(0.63 - 0.83\mathrm{Da}\right)\mathrm{Re}^{1.19\mathrm{Da}+0.4}.$$

В общем, показано, что нанесение проницаемых слоев на обтекаемые тела является одним из эффективных способов управления потоками жидкости, регулирования теплообмена.

В пятой главе исследуется инерционное улавливание, осаждение частиц и капель на рабочих поверхностях тел, обтекаемых гетерогенными средами. В случае, когда объем дисперсной фазы занимает менее 2% смеси, необходимо отслеживать траектории отдельных частиц и капель, математическое моделирование движения монодисперсных смесей осуществляется в рамках эйлерово-лагранжева подхода, согласно которому движение несущей фазы описывается уравнениями Навье-Стокса (1)-(3), а движение и теплообмен частиц – уравнениями (7)-(8).

На примере обдувания кругового цилиндра воздухом с частицами корунда демонстрируются изменения картины течения в гидродинамическом следе, влияние наличия частиц на сопротивление, подъемную силу и теплоотдачу цилиндра. Если подача частиц в поток осуществляется через узкую область входной границы, объемная концентрация примеси составляет $\beta = 6.3 \cdot 10^{-7}$, то в следе за телом формируются четко выраженные структуры (кластеры) с повышенной концентрацией частиц (рис. 6 а). Если дисперсные частицы подаются в поток вдоль всей входной границы расчетной области, подобные структуры не наблюдаются (рис. 6 б). Ориентировочно, при числе Стокса $\mathrm{Stk} = d_p^2 u_\infty \rho_p / 18\mu D \ge 0.35$ в следе за цилиндром появляются периодические области, в которых отсутствуют частицы. Причем, чем частицы крупнее, число их меньше, тем размеры участков больше (рис. 6 в). Когда объемная концентрация частиц возрастает, наблюдается подавление дорожки Кармана (рис. 6 г).

На рис. 7 а, б приводятся средние значения коэффициента сопротивления и амплитуды коэффициента подъемной силы. Увеличение массовой концентрации примеси γ_∞ приводит к увеличению коэффициента сопротивления цилиндра и уменьшению подъемной силы вследствие

подавления дорожки Кармана. Нелинейный характер функции $\overline{\mathrm{Nu}}(\gamma_\infty)$ иллюстрирует рис. 7 в. При увеличении массовой концентрации примеси γ_∞ от 0 до 59% теплоотдача возрастает в 1.6 раза.

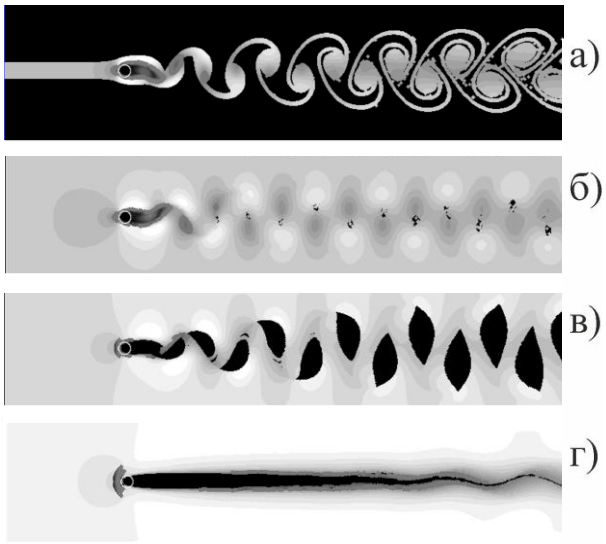


Рис. 6. Модуль скорости частиц примеси. Движение смеси слева направо (Re=100, D=0.1 м): подача частиц через узкую область Stk=0.1, $\beta = 6.3 \cdot 10^{-7}$ (а); Stk=0.1, $\beta = 6.3 \cdot 10^{-7}$ (б); Stk=1.0, $\beta = 6.3 \cdot 10^{-7}$ (в); Stk=2.0, $\beta = 3.2 \cdot 10^{-6}$ (г)

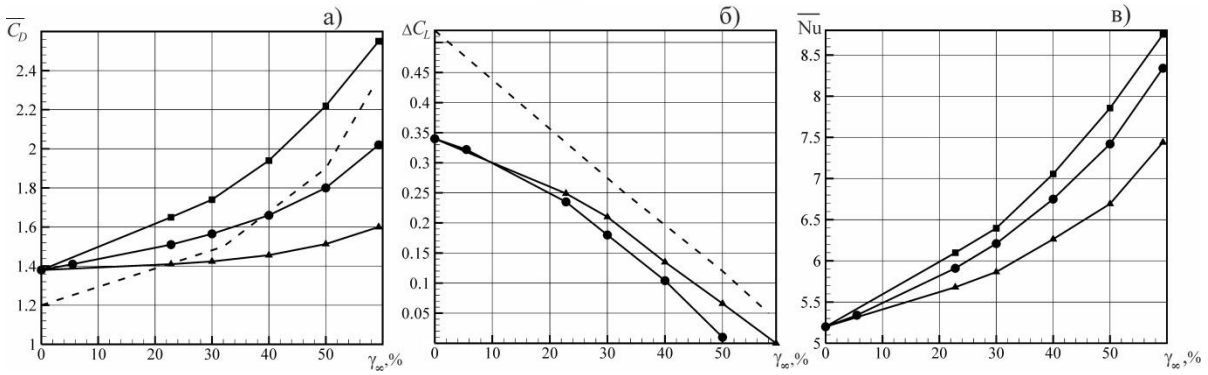


Рис. 7. Средние во времени коэффициент сопротивления (а) и амплитуда подъемной силы (б) цилиндра: сплошная линия – результаты настоящей работы (Stk=1), пунктирная – данные Волкова А.Н. и др. (2003) (Stk=0.0023); среднее значение числа Нуссельта при Re=100, Pr=0.75,: Stk=0.4 (■), Stk=1 (●), Stk=2 (▲) (в)

Далее рассматривается *влияние твердых частиц при обтекании суспензией вращающегося цилиндра*. Поведение основных гидродинамических и тепловых характеристик исследуемого процесса при Re=200 в зависимости от безразмерной скорости вращения поверхности цилиндра α_ω иллюстрирует рис. 8. Установлено, что по сравнению со случаем обтекания вращающегося цилиндра однородным потоком вбрасывание в поток твердых частиц с объемной концентрацией 1.5 % приводит к увеличению среднего коэффициента сопротивления цилиндра. Однако влияние примеси в зависимости от α_ω оказывается разным (рис. 8 а). Если при малых скоростях вращения $\alpha_\omega < 2.0$ коэффициент сопротивления увеличивается, в среднем, на 20%, то при скоростях его вращения, когда в следе за телом течение стационарно ($2.0 < \alpha_\omega < 4.3$), уже на 165%. Средний

коэффициент подъемной силы $\overline{C}_L$ уменьшается при наличии механической примеси в потоке (рис. 8 б). При этом влияние примеси оказывается тем значительнее, чем больше безразмерная скорость вращения цилиндра. При скорости вращения $\alpha_\omega < 3.0$ вбрасывание примеси в однородный поток вязкой жидкости несколько интенсифицирует теплообмен, число Нуссельта $\overline{\mathrm{Nu}}$ увеличивается, приблизительно, на 15% (рис. 8 в). Дальнейшее увеличение скорости вращения цилиндра ведет к ухудшению теплообмена до 55%.

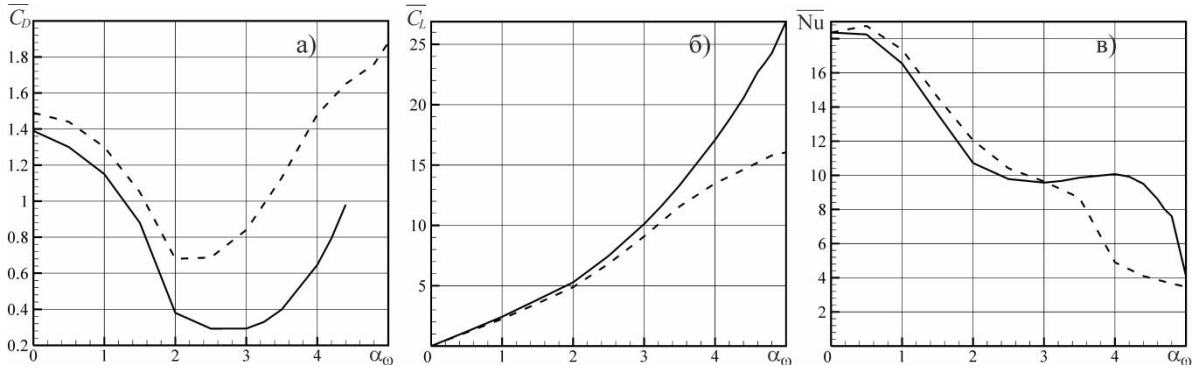


Рис. 8. Зависимость среднего коэффициента сопротивления цилиндра (а), среднего значения коэффициента подъемной силы (б), среднего числа Нуссельта (в) от относительной скорости вращения α_ω: сплошная линия – однородный поток воды (Pr=7.0), пунктирная линия – поток воды с частицами (сталь) (Stk=0.9)

Для охлаждения оборотной воды на предприятиях нефтехимической, других отраслей промышленности широко применяются градирни. При их эксплуатации для предотвращения выбросов воды в окружающую среду используются, в частности, жалюзийные *каплеуловители*, которые представляют собой решетки из пластин (лопаток) различной конфигурации. Исследуется эффективность работы широко применяемых каплеуловителей с уголковыми (рис. 9 а) и трапециевидными (рис. 9 б) лопатками, а также с предлагаемой новой V-образной формой лопаток (рис. 9 в).

В инерционных улавливающих устройствах, каковыми являются рассматриваемые каплеуловители, осаждение капель осуществляется за счет изменения направления воздушного потока и его скорости. Эффективность улавливания капель жидкости зависит от их размера. Показано, что мелкие капли ($d_p < 2 \cdot 10^{-5}$ м) увлекаются потоком воздуха, двигаясь вдоль линий тока. Они практически не оседают на лопатках каплеуловителей. Достаточно крупные капли жидкости ($d_p > 6 \cdot 10^{-5}$ м), двигаясь вверх по инерции, не успевают изменить направление движения, лишь незначительно отклоняясь вблизи поворотов решетки, осаждаются на поверхности лопаток, в таком случае они считаются уловленными.

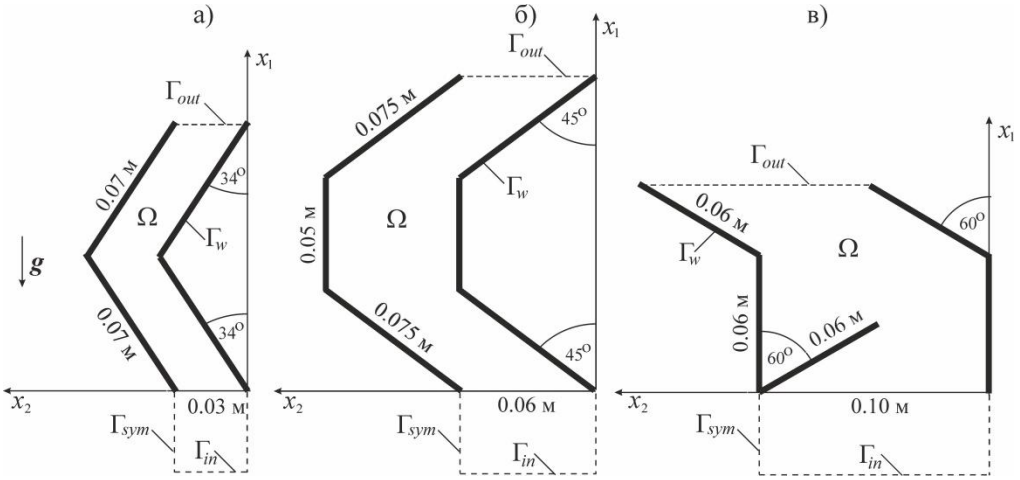


Рис. 9. Схемы ячеек периодичности каплеуловителей с лопатками разного профиля

На рис. 10 показаны траектории движения капель диаметром $d_p = 4 \cdot 10^{-5}$ м в ячейках периодичности каплеуловителей с различными конфигурациями лопаток. Осаждение капель среднего размера осуществляется, в основном, на верхней части лопаток под влиянием сил инерции, когда воздушный поток отклоняется от начального направления, обтекая решетку улавливающего устройства.

Анализ результатов расчетов траекторий капель показал, что для обеспечения высокой эффективности улавливающих устройств необходимо, чтобы количество поворотов потока воздуха в ячейке периодичности было бы минимальным, а интенсивность движения воздуха в канале менялась бы, по возможности, максимально. Данным требованиям соответствует предложенная V-образная конфигурация лопаток (рис. 9 в).

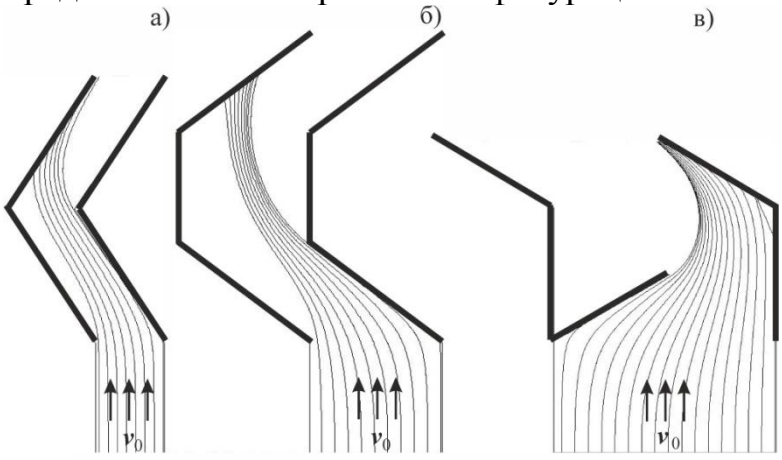


Рис. 10. Траектории капель диаметром $d_p = 40$ мкм в ячейках периодичности каплеуловителей при скорости газа перед решеткой $u_0 = 2.5$ м/с

Эффективность конструкции каплеуловителя определяется тремя показателями: коэффициентом улавливания капель ζ, потерями давления и затратами на производство решеток. Коэффициент ζ, определяемый долей уловленных капель к общему количеству капель, зависит от многих факторов, в частности, от формы профиля лопаток, шага решетки, скорости воздушного потока, распределения капель по размерам, от угла, под которым

капли пересекают сечение решетки. В целом все конструкции показали приемлемую эффективность работы. V-образный каплеуловитель предпочтительнее использовать для сравнительно крупных капель $d_p > 55$ мкм при скорости воздуха $u_0 = 1.25$ м/с и для $d_p > 40$ мкм при $u_0 = 2.5$ м/с. Увеличение скорости воздуха в два раза приводит к некоторому "выпрямлению" траекторий капель, при этом эффективность улавливания во всех случаях возрастает с увеличением скорости воздуха с 1.25 м/с до 2.5 м/с. К недостаткам предложенной конфигурации каплеуловителя можно отнести относительно высокие потери давления, а к преимуществам – экономию материалов при изготовлении, обусловленной относительно большим шагом решетки и малой высотой. Кроме того, наличие острого угла способствует повышению жесткости лопаток каплеуловителя. Предложенную конфигурацию можно взять за основу при разработке новых систем улавливания, а также перспективных устройств конденсации паров воды, когда острый угол перекрывается стенкой, в лопатке образуется полость, куда поступает холодный наружный воздух.

Анализ работы сетчатых демистеров, представляющих собой 20 рядов прутков проволоки, расположенных в шахматном порядке, при различных геометрических и режимных параметрах, показал, что при малых скоростях набегающего потока воздуха (1 м/с) обдувание прутков проволоки диаметром d=0.28 мм происходит в стационарном режиме. Капли жидкости диаметром более 5 мкм под влиянием сил инерции улавливаются, в основном, на первом и втором ряду прутков. Капли малых размеров (1 мкм) выносятся наружу образующимися сквозными струями воздуха, проходящими через весь слой демистера. При увеличении скорости набегающего потока воздуха до 2 м/с и более обдувание прутков проволоки носит нестационарный характер. При этом за счет периодически образующихся микроструй капли постоянно меняют направление движения и оседают не только на проволоках первого и второго рядов, но и последующих. Установлено, что в случае, когда прутки проволоки полностью перекрывают «просвет», в целях экономии материалов и снижения перепада давления, достаточно оставить 2-3 ряда проволоки, поскольку сепарация капель осуществляется только на первых рядах. Увеличение горизонтального расстояния между центрами масс прутков до $3d$ и больше нецелесообразно, поскольку это приводит к уносу большого количества капель. Расчетным путем показана эффективность конфигурации сетчатого демистера с горизонтальным расстоянием между прутками проволоки h_d, равным $2.5d$ (рис. 11). Данная конструкция обеспечивает высокую эффективность сепарации капель диаметром 5 мкм и больше при сравнительно низком аэродинамическом сопротивлении.

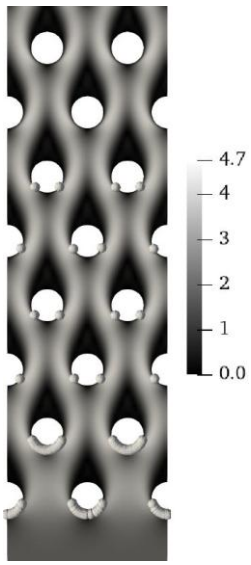


Рис. 11. Поле модуля скорости воздуха и положение капель диаметром d_p=10 мкм при u_0=2 м/с, $h_d = 2.5d$

Для выявления характерных особенностей процессов, эффектов, возникающих при осаждении капель в инерционных улавливающих устройствах, напылении полимерных порошковых материалов сформулирована и решена модельная *задача о формировании тонкой пленки из жидких капель на поверхности цилиндра и последующем ее гравитационном стекании*. Движение пленки моделируется в рамках теории мелкой воды. Оценивается скорость жидкости в пленке. Показано, что поперечная неустойчивость контактной линии приводит к образованию пальцеобразных структур пленки на поверхности цилиндра.

Шестая глава посвящена исследованию ряда технологических процессов базирующихся на барботаже, имплозионной технологии. Моделирование течений с границами раздела фаз газ-жидкость осуществляется с использованием метода объема жидкости (VOF). Для валидации математической модели и верификации численных методов решена классическая тестовая задача об обрушении столба жидкости в прямоугольном резервуаре. Получено согласие расчетных значений положения фронта жидкости с известными экспериментальными данными.

Задача о всплытии одиночного пузырька в неподвижной жидкости важна для практики, теории газожидкостных потоков. На газовый пузырек, всплывающий в покоящейся жидкости, действуют сила Архимеда, тяжести, гидродинамического сопротивления, поверхностного натяжения, инерции, сила, связанная с присоединенной массой, «наследственная» сила Бассе. Из анализа задачи о всплытии одиночного пузырька в вязкой жидкости следует, что она содержит четыре основных безразмерных параметра: отношение плотности ρ_l/ρ_g и вязкости μ_l/μ_g двух сред, число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \rho_l g^{1/2} d^{3/2}/\mu_l$ и число Бонда $\mathrm{Bo} = \rho_l g d^2/\sigma$. Моделирование данного трехмерного процесса требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для установления гидродинамических особенностей задача решается в двумерной постановке. Следует заметить, что замена трехмерных (пространственных) объектов на двумерные (плоские) при математическом моделировании гидроаэродинамики, теплопереноса практикуется достаточно

широко. Несмотря на то, что при двумерной постановке задачи области, в которых находится газовая среда, представляют собой, по существу, бесконечно протяженные полости в направлении, перпендикулярном к плоскости течения жидкости, тем не менее, будем называть их по прежнему «пузырьками». Рассмотрим влияние формы пузырька в начальный момент времени на динамику всплытия. Предполагается, что поперечные сечения воздушных полостей имеют эллиптическую форму с коэффициентом сжатия η. В начальный момент времени пузырек из состояния покоя начинает движение вверх с ускорением (рис. 12). Увеличение скорости пузырька обусловлено изменением его формы под влиянием действующих на него массовых и поверхностных сил. Показано, что при всплытии пузырька с параметрами $\rho_l/\rho_g = 10$, $\mu_l/\mu_g = 10$, Re=35, Bo=10 скорость всплытия имеет один максимум. В случае, когда вертикальная полуось больше горизонтальной, сильно вытянутый эллипсоидальный пузырек под действием силы поверхностного натяжения стремится к круглой форме за счет относительно высоких скоростей в нижней его части, в то время как верхняя его часть остается малоподвижной. Соответственно, наиболее активная деформация межфазной поверхности наблюдается в кормовой части пузырька, где образуется струя жидкости, направленная внутрь пузыря. Установлено, что чем меньше η, тем больше ускорение, тем выше максимальная скорость всплытия. Затем скорость пузырька монотонно снижается до постоянного значения $u_{rise}^{const} \approx 0.18$, когда пузырек принимает устойчивую стабильную форму. При этом величина u_{rise}^{const} не зависит от начальной формы пузырька, а только от его диаметра, физических свойств обеих фаз и ускорения свободного падения.

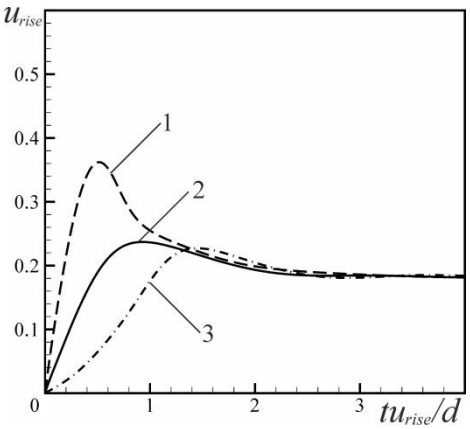


Рис. 12. Изменение безразмерной скорости всплытия $u_{rise} = u/\sqrt{gd}$ полости с течением безразмерного времени при разных коэффициентах сжатия:
$\eta = 0.309$ (1), $\eta = 1.00$ (2), $\eta = 3.24$ (3)

При анализе *динамики одновременного всплытия двух воздушных полостей* в воде дополнительным определяющим параметром является начальное безразмерное (отнесенное к диаметру полости) расстояние между ними S. В случае, когда расстояние между пузырьками достаточно мало ($S < 1.3$), при всплытии они объединяются в один крупный пузырек (рис. 13 а). Сначала между газовыми включениями формируется тонкая перемычка, после чего под действием сил поверхностного натяжения они сливаются.

Вновь образованный крупный пузырек движется вверх. В процессе всплытия его форма непрерывно меняется. Наблюдаемую коалесценцию можно объяснить тем, что скорость течения в зазоре между пузырьками на начальном этапе подъема относительно велика, модуль скорости направленной вниз струи жидкости между пузырьками больше модуля скорости их всплытия. Согласно уравнению Бернулли в области с высоким расходом давление низкое. Появившаяся разница давлений в горизонтальном сечении заставляет пузырьки притягиваться друг к другу. При этом за ними образуется единый гидродинамический след.

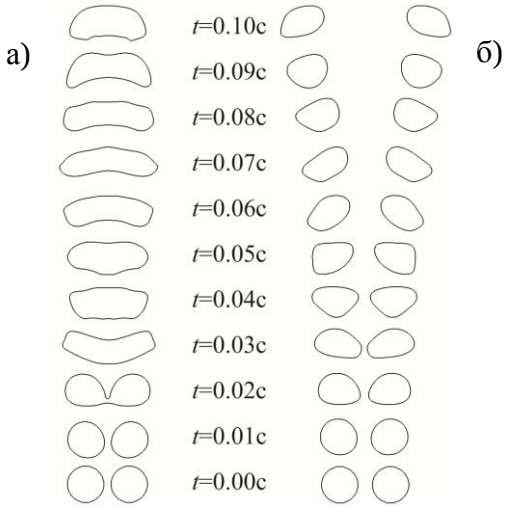


Рис. 13. Всплытие двух пузырьков воздуха ($d = 4 \cdot 10^{-3}$ м), расположенных в начальный момент времени на одном уровне: S=1.2d (а), S=1.4d (б)

Когда начальное расстояние между пузырьками равно S=1.4, при всплытии расстояние между ними постепенно увеличивается (рис. 13 б) вследствие действия сил вязкого трения. За каждым пузырьком формируются вихревые структуры гидродинамического следа, которые взаимодействуют и деформируются. В результате чего траектории движения пузырьков отклоняются от вертикального направления. Следует также отметить, что взаимное влияние пузырьков ослабевает с увеличением расстояния между ними. При всплытии пузырьков друг за другом, когда нижний пузырек попадает в область гидродинамического следа верхнего, он начинает двигаться с ускорением, что приводит к коалесценции.

Выполнено также численное моделирование *схлопывания сферической газовой полости в жидкости под действием перепада давления* в жидкости и газе. Рассматривается цилиндрический резервуар, наполненный жидкостью (рис. 14 слева). В центр резервуара помещается содержащая газ тонкостенная сфера, которая при схлопывании разрушается мгновенно. Для описания имплозионного процесса предложена математическая модель, учитывающая наличие двух фаз, вязкие эффекты, сжимаемость газа, нестационарность, теплообмен, турбулентность и другие факторы. Математическое моделирование движения двухфазной среды основано на методе объема жидкости. Предполагается, что движение жидкости и газа является турбулентным. Записываются уравнения состояния совершенного газа и слабосжимаемой жидкости

$$\rho_g = p_g / R_g T_g\,,\ \rho_l = \rho_{l,0} + p_l / R_l T_l\,. \qquad (9)$$

где R_g, R_l, $\rho_{l,0}$ – константы. Вводится маркерная функция γ, характеризующая объемную долю жидкой фазы в ячейке расчетной области: $\gamma = 1$, если ячейка заполнена жидкостью; $\gamma = 0$, если газом; $0 < \gamma < 1$ при прохождении через ячейку межфазной границы. Термодинамические характеристики ϑ такие, как плотность, коэффициент динамической вязкости, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, скорость, давление, температура среды рассчитываются по соответствующим значениям параметров жидкости (индекс l) и газа (индекс g) с использованием маркерной функции γ: $\vartheta = \vartheta_l \gamma + \vartheta_g (1-\gamma)$.

Математическая модель имплозионного процесса включает уравнения неразрывности, изменения количества движения, определения положения межфазной поверхности, энергии, записанные относительно осредненных по Фавру величин:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0\,, \qquad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \boldsymbol{u}) + \sigma \kappa \nabla \gamma\,, \qquad (11)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \boldsymbol{u}) + \nabla \cdot \left[(1-\gamma) \gamma \boldsymbol{u}_r \right] = -\frac{\gamma}{\rho_l} \frac{D\rho_l}{Dt}\,, \qquad (12)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} T) = \nabla \cdot \left(\frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}} + \frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_T} \right) \nabla T \right) - \left(\frac{\gamma}{c_{v,l}} + \frac{1-\gamma}{c_{v,g}} \right) \left(\frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} K) + \nabla \cdot (\boldsymbol{u} p) \right). \qquad (13)$$

Здесь $\boldsymbol{u}$ – вектор скорости среды, t – время, $\kappa = -\nabla \cdot \boldsymbol{n}$ – кривизна свободной поверхности, $\boldsymbol{n} = \nabla\gamma / |\nabla\gamma|$ – единичная нормаль к поверхности раздела фаз, σ – коэффициент поверхностного натяжения, c_p, c_v – теплоемкость при постоянном давлении, объеме, μ_T – коэффициент турбулентной вязкости, Pr_T – турбулентное число Прандтля, $K = |\boldsymbol{u}|^2 / 2$ – кинетическая энергия. Для предотвращения диффузии границ раздела и улучшения четкости интерфейса в уравнении (12) вводится слагаемое $\nabla \cdot \left((1-\gamma) \gamma \mathbf{u}_r \right)$, где $\boldsymbol{u}_r = (\nabla\gamma / |\nabla\gamma|) \min\left(c_\gamma |\boldsymbol{u}|, \max |\boldsymbol{u}| \right)$, c_γ – коэффициент сжатия. Для замыкания системы уравнений (9)-(13) используется модель турбулентности Ментера SST. В начальный момент среда покоится. На стенках резервуара задаются условия прилипания.

В численных экспериментах начальный радиус сферической полости варьируется от 0.01 до 0.09 м, давление газа – от 0.05 до 0.5 МПа при

постоянном давлении жидкости 7 МПа. Основное внимание уделяется распространению волн давления в жидкости. Вначале под действием перепада давления жидкость устремляется к центру сферической полости. В фазе сжатия газовой полости плотность, давление и температура газа возрастают. При этом от межфазной границы в жидкости распространяется волна разрежения (рис. 15). В момент, когда объем полости достигает минимального значения, жидкость внезапно останавливается, зарождается сферическая волна сжатия. Следует отметить, что при этом максимальное давление в контрольной точке на расстоянии 0.1016 м от центра полости значительно превышает начальное гидростатическое. Сравнение с экспериментальными данными показано на рис. 16.

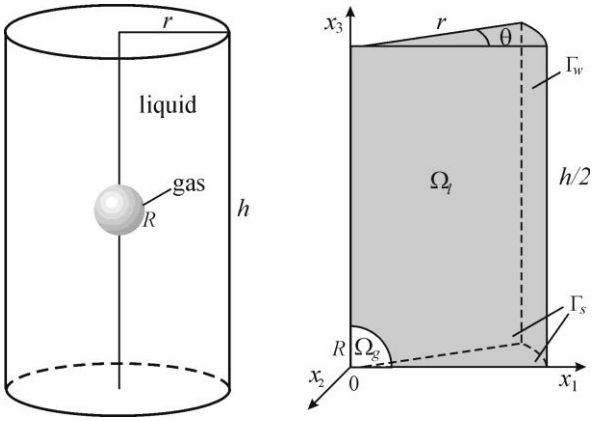


Рис. 14. Схемы физической и расчетной области (цилиндрический сектор)

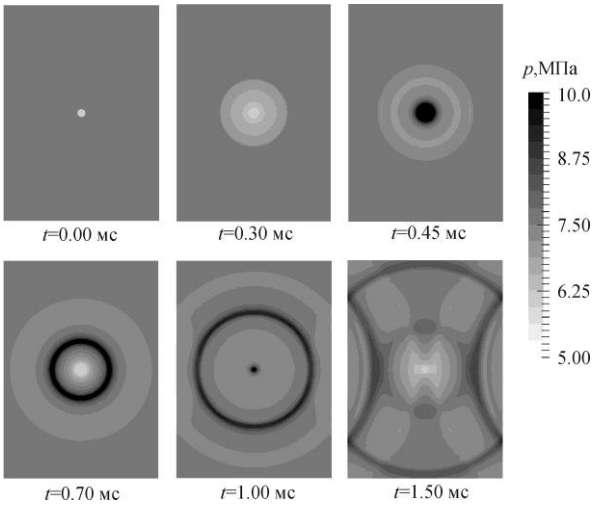


Рис. 15. Поля давления в вертикальном сечении области

Волны разрежения и сжатия распространяются радиально по жидкости к стенкам резервуара (рис. 17). По мере движения волны от центра к периферии максимальное значение давления уменьшается. Достигнув стенки, волна сжатия отражается от нее. Расчетные значения плотности и давления в газовой полости свидетельствуют о том, что формирование ударной волны в газе при заданных условиях не происходит, газовая среда сжимается однородно. Получены зависимости радиуса газовой полости, скорости межфазной границы, турбулентной кинетической энергии от времени, а также рассчитано изменение формы полости в течение имплозионного процесса.

В результате обработки численных результатов в рассматриваемом диапазоне расчетных параметров $0.01 \le R_0 \le 0.09$ м, $0.05 \le p_{g,0} \le 0.5$ МПа при исходном давлении жидкости $p_{l,0} = 7$ МПа предложена аппроксимационная формула для расчета максимального давления $p_{\max}$, МПа на удалении $l =$ 0.1016 м от центра полости в зависимости от начального радиуса R_0 газовой полости и начального давления газа $p_{g,0}$:

$$p_{\max} = 200.8 \cdot \left(p_{g,0} \right)^{-0.4} R_0 + 8.6 \cdot \left(p_{g,0} \right)^{0.3}.$$

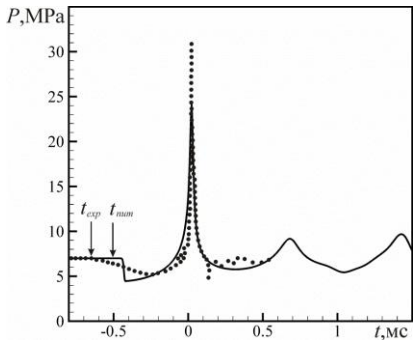


Рис. 16. Давление в контрольной точке с течением времени: (—) – расчет, (●) – эксперимент Turner S.E. (2007)

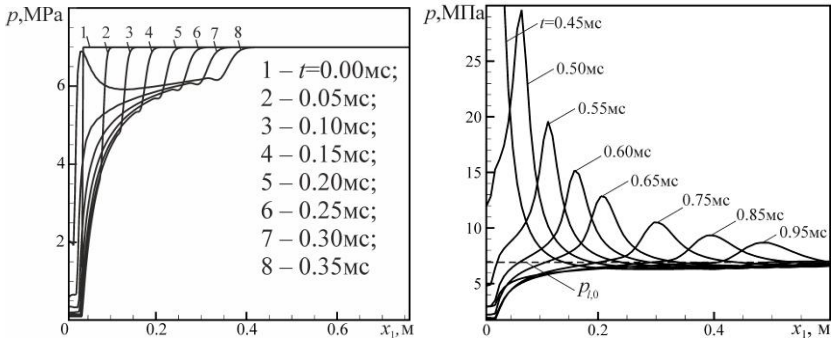


Рис. 17. Давление вдоль оси Ox_1 в разные моменты времени: движение волны разряжения (слева) и волны сжатия (справа) ($R_0 = 0.038$ м)

Необходимо заметить, что явление имплозии используется также при эксплуатации нефтедобывающих скважин, когда возникает необходимость в улучшении фильтрационных характеристик призабойной зоны пласта. Выполнено численное исследование *волновых процессов в обсадной колонне вертикальной скважины*, инициированных перепадом давления в имплозионном устройстве и окружающей его скважинной жидкости. Рассмотрена скважина глубиной H, заполненная жидкостью до уровня h_1. На глубине h_2 находится газовая камера низкого давления ($p_{g,0} = 0.1$ МПа) (рис. 18). Камера имеет цилиндрическую форму с мембранной перегородкой на нижнем торце. В начальный момент времени давление в контрольной точке, находящейся на уровне мембраны, составляет $p_0 =$ 18 МПа (рис. 19). После устранения мембраны величина давления резко падает. Период депрессии длится около 2.4 с. В данный период понижение давления $p < p_0$ в обсадной колонне скважины на уровне пласта способствует очистке перфорационных каналов от механических примесей и восстановлению проницаемости пласта. В начале второй стадии происходит рост давления за счет падающего столба жидкости. Максимальное давление в контрольной точке при этом превышает гидростатическое давление в 1.35 раза. Данный этап на практике будет сопровождаться образованием разветвленной системы микротрещин в нефтяном пласте. За первым следует второй цикл имплозионного процесса. Давление вновь понижается, и затем наблюдается еще одна волна сжатия. Однако наиболее интересные эффекты происходят во время первого цикла сжатия-расширения воздушной полости. Вторичные пульсации являются менее интенсивными. В конце процесса система жидкость-газ приходит в гидростатическое равновесие.

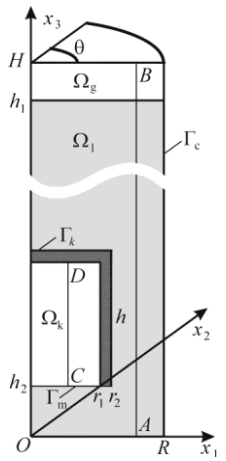


Рис. 18. Схема расчетной области

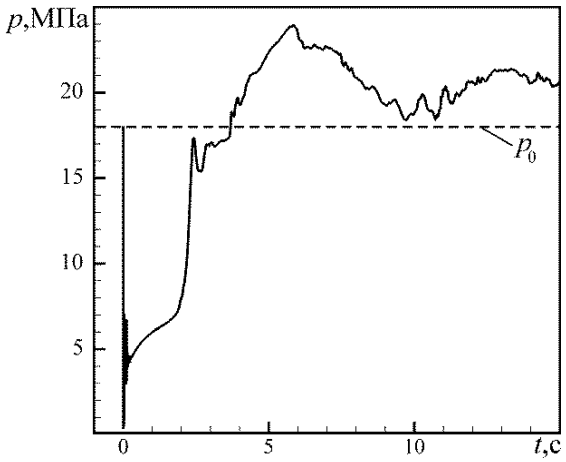


Рис. 19. Эволюция давления на уровне мембраны имплозионной камеры, p_0 – начальное гидростатическое давление

Уменьшение высоты камеры h с 50 до 10 м сокращает время депрессии на уровне мембраны в 8.3 раза, при этом максимальное давление увеличивается только на 8.6%. Поскольку на практике эффективность имплозионного воздействия на призабойную зону пласта определяется длительностью периода депрессии в скважине и амплитудой последующего повышения давления, то выбор камеры высотой 50 м является при данных условиях предпочтительным, нефтеотдача пласта достигает наибольших значений.

В **заключении** сформулированы выводы, полученные по результатам исследования.

В **приложении** представлены акты внедрения результатов работы.

Заключение

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе развиты теоретические основы гидроаэродинамических и тепловых процессов, протекающих в технологических установках нефтехимической отрасли; с использованием математических моделей динамики многофазных систем и численных методов установлены закономерности, с помощью которых найдены рациональные конструктивные параметры, технологические режимы установок, разработаны новые научно обоснованные высокоэффективные технические решения.

В работе получены следующие основные результаты и выводы.

1. Показано, что для снижения гидродинамического сопротивления тела в потоке, интенсификации теплообмена в зависимости от специфики условий эксплуатации технологического оборудования можно использовать разные способы воздействия на структуру течения. Картина обтекания, коэффициенты сопротивления, подъемной силы, теплоотдача цилиндрических тел, размещенных в потоке вязкой жидкости, меняются в случае вращения их с постоянной скоростью вокруг своей оси, реализации вращательных колебаний цилиндров, турбулизации потока,

размещении тел в потоке тандемом, нанесении на них пористого проницаемого слоя. Найдены скорости вращения цилиндра, размещенного в потоке вязкой жидкости, при которых наблюдается снижение коэффициента сопротивления тела в 4-5 раз; режимы вращательных колебаний цилиндра, при которых снижается сопротивление на 32%.

2. Подача твердых частиц в поток жидкости приводит к увеличению коэффициента сопротивления цилиндрического тела, подавлению дорожки Кармана. Степень влияния частиц зависит от числа Стокса и массовой концентрации дисперсной фазы. Число Нуссельта цилиндра тем больше, чем выше число Рейнольдса и теплопроводность материала частиц. На основе анализа движения газовзвеси в ячейках периодичности каплеуловителей градирен сформулированы требования к конфигурации лопаток решеток, предложена их новая форма. Показано, что в режиме нестационарного движения воздуха в сетчатых демистерах за счет формирования микроструй повышается эффективность инерционного улавливания капель.
3. Показано влияние начальной формы газового пузырька на динамику его всплытия в неподвижной жидкости, скорость подъема. Установлено, что причиной сближения параллельно всплывающих пузырьков и последующей коалесценции при барботаже является локальное понижение давления между пузырьками. Удаление пузырьков друг от друга обусловлено силами вязкого трения в процессе взаимодействия вихревых структур гидродинамического следа.
4. Построена трехмерная математическая модель, описывающая динамику имплозионного процесса, включающего схлопывание газовой полости в жидкости и последующее распространение волн давления. В отличие от одномерного уравнения Релея-Плессета, на котором базируются предыдущие исследования динамики пузырька, она основана на физических законах сохранения массы, импульса, энергии с учетом вязкости сред, сжимаемости, теплопроводности жидкости и турбулентности.
5. Показано, что в процессе имплозии газовой полости в окружающей жидкости за волной разрежения следует волна сжатия, причем пиковое давление значительно, в 3.5 раза, превышает начальное гидростатическое. Получена аппроксимационная формула для расчета максимального давления при распространении сферической волны сжатия в жидкости. Анализ результатов исследования имплозионного процесса в обсадной колонне скважины показал, что увеличение высоты камеры низкого давления до 50 м повышает эффективность гидроимпульсного метода воздействия на призабойную зону за счет увеличения длительности процесса.

Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, входящие в базы данных Scopus и Web of Science

1. **Morenko, I.V.** Numerical simulation of the propagation of pressure waves in water during the collapse of a spherical air cavity / I.V. Morenko // Ocean Engineering. – 2020. Vol. 215. – Article number 107905.
2. **Моренко, И.В.** Математическое моделирование движения двух несмешивающихся сред с подвижными поверхностями раздела фаз / И.В. Моренко // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2026. – Т. 168, кн. 1. – С. 77-88.
3. **Моренко, И.В.** Улавливание капель при охлаждении оборотной воды в испарительных градирнях / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2025. – № 97. – С.130-142.
4. **Morenko, I.V.** Interaction of two gas bubbles rising one after another in a liquid / I.V. Morenko // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2024. – Vol. 45, N. 5. – P. 2094-2102.
5. **Моренко, И.В.** Влияние начальной формы пузырька на динамику всплытия в неподвижной вязкой жидкости / И.В. Моренко // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2023. – № 3. – С. 83-93.
6. **Morenko, I.V.** Comparison of the results of 2D and 3D numerical simulations of the rising bubble in stagnant viscous liquid / I.V. Morenko // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2023. – Vol. 44, N. 5. – P. 1752-1757.
7. **Моренко, И.В.** Математическое моделирование структур газожидкостного течения в кольцевом канале с внутренним вращающимся цилиндром / И.В. Моренко // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 1. – С. 103-110.
8. **Моренко, И.В.** Особенности волнового процесса в обсадной колонне скважины при имплозии / И.В. Моренко // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 2. – С. 513-519.
9. **Morenko, I.V.** Heat transfer from a heated cylinder rotating around its axis in laminar and turbulent crossflows of liquid / I.V. Morenko // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, N. 6. – P. 776-781.
10. **Моренко, И.В.** Численное моделирование имплозионного процесса в цилиндрическом резервуаре / И.В. Моренко // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 5. – С. 755-763.
11. **Моренко, И.В.** Численное моделирование обрушения столба жидкости в резервуарах разной формы / И.В. Моренко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 60. – С. 119-131.
12. **Моренко, И.В.** Поперечное обтекание вращающегося кругового цилиндра вязкой жидкостью / И.В. Моренко // Известия вузов. Авиационная техника. – 2018. – № 1. – С. 47-50.

13. **Моренко, И.В.** Неизотермическое поперечное обтекание цилиндра квадратного сечения с непроницаемым ядром, покрытым пористым слоем / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 3. – С. 426-432.
14. **Моренко, И.В.** Ламинарное обтекание вязкой несжимаемой жидкостью цилиндра, совершающего вращательные колебания / И.В. Моренко // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 3. – С. 365-371.
15. **Morenko, I.V.** Influence of turbulence intensity and turbulence length scale on the drag, lift and heat transfer of a circular cylinder / I.V. Morenko, V.L. Fedyaev // China ocean engineering. – 2017. – Vol. 31, N. 3. – P. 357-363.
16. Губайдуллин, Д.А. Математическое моделирование процессов, протекающих при получении пористых композитных материалов, формировании покрытий / Д.А. Губайдуллин, В.Л. Федяев, **И.В. Моренко** // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2017. – Т.18, вып. 2. – С. 1-12.
17. **Моренко, И.В.** Неизотермическое обтекание кругового цилиндра с проницаемым слоем при умеренных числах Рейнольдса / И.В. Моренко, Б.А. Снигерев // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 895-900.
18. Губайдуллин, Д.А. Математическое моделирование неизотермических процессов струйного напыления полимерных порошковых композиций и формирования защитных покрытий / Д.А. Губайдуллин, В.Л. Федяев, **И.В. Моренко** // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2016. – Т. 17, вып. 4. – С. 1-14.
19. **Моренко, И.В.** Гидродинамика и теплообмен кругового цилиндра в ограниченном ламинарном потоке вязкой жидкости с частицами примеси / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Теоретические основы химической технологии. – 2015. – Т. 49, № 6. – С. 708-716.
20. Губайдуллин, Д.А. Неизотермическое обтекание дисперсными средами вращающихся тел / Д.А. Губайдуллин, В.Л. Федяев, **И.В. Моренко** // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2015. – Т. 16, вып. 3. – С. 1-10.
21. **Моренко, И.В.** Расчет ламинарного неизотермического обтекания кругового цилиндра с проницаемым слоем / И.В. Моренко, Б.А. Снигерев // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2015. – № 2. – С. 71-76.
22. Губайдуллин, Д.А. Теплоотдача кругового цилиндра в потоке суспензии / Д.А. Губайдуллин, **И.В. Моренко**, В.Л. Федяев // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 99-101.
23. **Моренко, И.В.** Ламинарное неизотермическое обтекание вращающегося кругового цилиндра вязкой жидкостью с твердыми частицами / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т.87, № 3. – С.549-555.

24. **Моренко, И.В.** Неизотермическое обтекание кругового цилиндра монодисперсной смесью / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т. 3, № 6. – С. 242-252.
25. **Моренко, И.В.** Особенности обтекания цилиндра двухфазным потоком / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2010. – № 4. – С. 52-58.
26. Мазо, А.Б. Ламинарное обтекание тандема круговых цилиндров потоком вязкой жидкости / А.Б. Мазо, **И.В. Моренко** // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2005. – Т. 147, кн. 3. – С. 148-156.
27. Мазо, А.Б. Численное моделирование вязкого отрывного обтекания вращающегося кругового цилиндра / А.Б. Мазо, **И.В. Моренко** // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 3. – С. 75-81.

Иные работы по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях

28. **Моренко, И.В.** Расчет неизотермического движения двухфазной среды с учетом сжимаемости при имплозии / И.В. Моренко, Ю.А. Волков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 1-2. – С. 128-137.
29. **Моренко, И.В.** О влиянии проницаемости бруса квадратного сечения на течение и теплообмен / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 68-75.
30. **Моренко, И.В.** О влиянии частиц примеси на сопротивление и теплоотдачу кругового цилиндра, обтекаемого вязкой жидкостью / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, № 6. – С. 120-125.
31. **Моренко, И.В.** Влияние турбулентности потока вязкой жидкости на гидродинамические характеристики и теплообмен обтекаемых тел / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №7-8. – С. 36-45.

Материалы конференций

32. **Моренко, И.В.** Математическое моделирование движения двух несмешивающихся сред с подвижными поверхностями раздела фаз / И.В. Моренко // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2025»– Казань: Казанский ун-т, 2025. – С. 404-408.
33. **Моренко, И.В.** Математическое моделирование движения дисперсных частиц вблизи обтекаемых тел / И.В. Моренко // Сб. статей XVII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» – Казань: Изд-во АН РТ, 2025. – С. 92-96.
34. **Моренко, И.В.** Численное исследование нестационарного всплытия пузырьков при аэрации / И.В. Моренко // Материалы МНТК «ИМТОМ–2022». Ч. 1. – Казань, 2022. – С. 85-89.

35. **Моренко, И.В.** Распространение волны сжатия в жидкости при схлопывании сферической газовой полости в условиях неизотермичности / И.В. Моренко // Материалы X Юбилейной международной научно-технической конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» – Казань: Изд-во Казанского университета, 2019. – С. 251-254.
36. **Моренко, И.В.** Моделирование течений слабосжимаемой вязкой жидкости с помощью OpenFOAM / И.В. Моренко // Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» – Казань: Изд-во Казанского университета, 2018. – С. 156-160.
37. **Моренко, И.В.** Воздействие вынужденных колебаний цилиндра на отрывное обтекание несжимаемой жидкостью / И.В. Моренко // Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова – Казань: КазНЦ РАН, 2016. – С. 101-104.
38. **Моренко, И.В.** Вынужденная теплоотдача кругового цилиндра с пористым проницаемым слоем / И.В. Моренко // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2015)» – Казань: Изд-во «Бриг», 2015. – С. 491-495.
39. **Моренко, И.В.** Интенсификация теплообмена кругового цилиндра в турбулентном набегающем потоке / И.В. Моренко, В.Л. Федяев // Материалы всеросс. науч. конф. «Обратные краевые задачи и их приложения» – Казань: Изд-во Казанского университета, 2014. – С. 1-9.