

УДК 532.529

# ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ, КАПЛЯМИ И ПУЗЫРЬЯМИ

© 2023 г. А. Ю. Вараксин<sup>1, 2, \*</sup><sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*E-mail: varaksin\_a@mail.ru

Поступил в редакцию 07.09.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принят к публикации 04.12.2023 г.

Рассмотрены основные проблемы и особенности изучения двухфазных потоков. Кратко описаны основные методы математического моделирования двухфазных потоков, описывающие на различном иерархическом уровне межфазную границу, межфазные взаимодействия и турбулентность несущей фазы. Описаны и проанализированы некоторые из последних результатов исследований двухфазных потоков с твердыми частицами, каплями и пузырями: эффективные способы тепловой защиты энергодвигательных установок, работающих на твердом топливе; определение вклада конденсации углеродных наночастиц в горение и детонацию газообразных углеводородов; методы борьбы с обледенением летательных аппаратов; особенности развития и устойчивости факела распыла; распространение акустических волн в многофракционных полидисперсных парагазокапельных смесях газа с твердыми частицами; развитие детонационных волн в пузырьковой жидкости и многие другие.

DOI: 10.31857/S0040364423060169

## ОГЛАВЛЕНИЕ

- Введение
1. Основные задачи изучения двухфазных потоков
  2. Классификация двухфазных потоков
    - 2.1. Классификация по объемной концентрации дисперсной фазы
    - 2.2. Классификация по инерционности дисперсной фазы
  3. Особенности изучения двухфазных потоков
  4. Современные методы моделирования двухфазных потоков
    - 4.1. Метод прямого численного моделирования с разрешением межфазной границы
    - 4.2. Методы численного моделирования без разрешения межфазной границы (методы точечных частиц)
    - 4.3. Прямое численное моделирование (результаты исследований)
    - 4.4. Метод крупных вихрей (результаты исследований)
  5. Двухфазные потоки с частицами
  6. Двухфазные потоки с каплями
  7. Двухфазные потоки с пузырями
- Заключение  
Список литературы

## ВВЕДЕНИЕ

Потоки сплошной газовой или жидкой среды, несущие дисперсную примесь в виде твердых частиц, капель или пузырей, имеют место в целом ряде природных явлений [1–3]: воздушные смерчи, песчаные бури, извержения вулканов, лесные пожары, выпадение осадков в виде града, снега, дождя, разные виды туманов, выделение газов в морях и океанах и т.п. Примерами технических устройств, в которых используются двухфазные течения, являются: камеры сгорания тепловых двигателей, тракты твердотопливных и жидкостных реактивных двигателей, устройства термодготовки угля, парогенераторы, системы пожаротушения, теплообменники с двухфазными рабочими телами, устройства песко- и дробеструйной обработки различных поверхностей, пневмотранспортеры сыпучих материалов, пылеуловители различных типов и многие другие.

Основные виды двухфазных систем следующие: газ–твердые частицы, газ–капли, жидкость–твердые частицы, жидкость–пузыри.

В последние десятилетия можно наблюдать устойчивый рост интереса многочисленных групп исследователей во всем мире к изучению двухфазных (многофазных) течений.

За 60 лет существования журнала “Теплофизика высоких температур” в нем опубликованы многие

сотни оригинальных и пионерских работ, посвященные тем или иным аспектам гидрогазодинамики и теплофизики многофазных потоков. Поэтому в настоящем обзоре для юбилейного номера журнала в разделах 5–7, посвященных описанию важнейших достижений в изучении двухфазных течений, совершенно заслуженно делается акцент на работах российских исследователей, опубликованных в последние годы именно в нашем журнале.

## 1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

К настоящему времени решено или находится в стадии решения колоссальное количество связанных с двухфазными потоками проблем, имеющих как самостоятельное фундаментальное, так и большое практическое значения. Некоторые результаты исследований приводятся в заключительных разделах обзора (разделы 5–7). Решение любой проблемы, связанной с двухфазными потоками, так или иначе, сопряжено с рассмотрением двух основных классов задач [4].

Первая (или прямая) задача заключается в изучении поведения взвешенной в потоке несущей среды (газа, жидкости) дисперсной примеси (частицы, капли, пузыри). Решение данной задачи предполагает нахождение характеристик дисперсных включений, а именно их размеров (в случае полидисперсного течения или наличия фазовых и/или химических превращений), полей их осредненных и пульсационных (средних квадратичных) скоростей и температур, концентраций и т.п.

Вторая (или обратная) задача заключается в изучении влияния дисперсной фазы на характеристики несущего ее потока сплошной среды. Решение этой задачи предполагает нахождение характеристик газа (жидкости) в присутствии частиц (капель, пузырей), т.е. полей осредненных и пульсационных (средних квадратичных) скоростей и температур, а также коэффициентов трения, теплоотдачи и т.п.

Исключительная сложность изучения двухфазных (многофазных) течений, вероятно, связана с двумя обстоятельствами. С одной стороны, это вызвано тем, что теория однофазных потоков (особенно турбулентных) находится в стадии своего развития. С другой — добавление в турбулентный поток дисперсной примеси в виде частиц (капель, пузырей) сильно осложняет картину течения. Это объясняется большим разнообразием свойств (прежде всего, инерционности) и концентраций дисперсных включений, что приводит к реализации многочисленных режимов (классов) двухфазных течений.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Наличие многочисленных режимов течения двухфазных сред, определяемых как параметрами несущей сплошной среды, так и параметрами дисперсной фазы, существенно осложняет использование классической теории моделирования. Попытки систематизации двухфазных потоков путем составления схем режимов течения [5], определения границ применимости математических моделей [6–9], поиска одного универсального параметра [10, 11], определяющего вид течения, не увенчались успехом. В [12] предлагается использовать совокупность классификаций по объемной концентрации дисперсной фазы и ее инерционности, которая приводится ниже.

### 2.1. Классификация по объемной концентрации дисперсной фазы

Экстенсивной физической характеристикой двухфазных потоков является концентрация дисперсной примеси. В [9, 13] приведены возможные разновидности двухфазных потоков (классификация) в зависимости от объемной концентрации дисперсной фазы  $\Phi$ . Различают три класса двухфазных потоков: 1) слабозапыленное течение без обратного влияния дисперсной фазы; 2) слабозапыленное течение с обратным влиянием дисперсной фазы; 3) сильнозапыленное течение с интенсивным столкновительным взаимодействием частиц между собой.

При моделировании движения частиц в слабозапыленных потоках ( $\Phi \leq 10^{-6}$ ), т.е. при небольшой объемной концентрации дисперсной фазы, основное внимание уделяется, как правило, установлению характеристик (поведения) частиц при их взаимодействии с турбулентными вихрями несущего потока. В англоязычной литературе такие расчеты получили название “one-way coupling” (OWC), что означает учет лишь однонаправленного воздействия несущего течения на взвешенные в нем частицы, полностью определяющего особенности их поведения.

С ростом концентрации частиц ( $10^{-6} < \Phi \leq 10^{-3}$ ), они, в свою очередь, начинают оказывать обратное влияние на характеристики (все без исключения) несущей среды [14–17]. Учет взаимного влияния дисперсной и несущей фаз существенно осложняет математическое моделирование двухфазного потока. Такие расчеты в англоязычной литературе называют “two-way coupling” (TWC).

Дальнейшее повышение концентрации частиц ( $\Phi > 10^{-3}$ ) приводит к необходимости учета вклада межчастичных взаимодействий в процесс переноса импульса и энергии дисперсной фазы [18–22]. Хаотизация движения частиц при их взаимодей-

ствии получила название псевдотурбулентности (“pseudoturbulence”) для отличия от собственно турбулентных пульсаций скоростей частиц, связанных с их вовлечением в турбулентное движение несущего потока. В сильнозапыленных потоках определяющую роль в формировании статистических свойств дисперсной фазы играют межчастичные столкновения. Учет парных (бинарных) столкновений частиц добавляет сложности при математическом моделировании. В англоязычной литературе такие расчеты называют “four-way coupling” (FWC).

## 2.2. Классификация по инерционности дисперсной фазы

В зависимости от диапазона изменения чисел Стокса в [12, 17] выделяют несколько основных классов двухфазных потоков с частицами и каплями (рис. 1). Кратко опишем их.

**2.2.1. Равновесное течение.** Отличительными особенностями данного течения являются равенство осредненных ( $U_{i,j,k} = V_{i,j,k}$ ) и пульсационных ( $u'_{i,j,k} = v'_{i,j,k}$ ) скоростей газа и частиц (капель) и следующий диапазон изменения основных чисел Стокса:  $Stk_f \rightarrow 0, Stk_L \rightarrow 0, Stk_K \approx O(1)$ .

**2.2.2. Квазиравновесное течение.** Особенности такого потока являются равенство осредненных ( $U_{i,j,k} = V_{i,j,k}$ ) и различие пульсационных ( $u'_{i,j,k} \neq v'_{i,j,k}$ ) скоростей газа и частиц (капель), а также следующий диапазон изменения основных чисел Стокса:  $Stk_f \rightarrow 0, Stk_L \approx O(1), Stk_K \approx O(1)$ .

**2.2.3. Неравновесное течение.** При реализации данного класса течения имеются различие как осредненных ( $U_{i,j,k} \neq V_{i,j,k}$ ), так и пульсационных ( $u'_{i,j,k} \neq v'_{i,j,k}$ ) скоростей газа и частиц (капель) и следующий диапазон изменения основных чисел Стокса:  $Stk_f \approx O(1), Stk_L \approx O(1), Stk_K \rightarrow \infty$ .

**2.2.4. Течение с крупными частицами (каплями).** Особенности такого двухфазного потока являются различие в осредненных ( $U_{i,j,k} \neq V_{i,j,k}$ ) скоростях фаз, полная инертность частиц (капель) по отношению к турбулентным пульсациям скорости газа ( $v'_{i,j,k} = 0$ ) и следующий диапазон изменения основных чисел Стокса:  $Stk_f \approx O(1), Stk_L \rightarrow \infty, Stk_K \rightarrow \infty$ .

**2.2.5. Обтекание неподвижной “замороженной” частицы (капли).** В этом случае частицы (капли) обладают экстремально большой инерционностью, что приводит к их полной неподвижности и неизменности температуры. Аналогом такого гипотетического класса двухфазных потоков является однофазное течение в теплообменниках, где в роли таких частиц выступают неподвижные трубы, по которым движется рабочее тело.

## 3. ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Многофазные (двухфазные) потоки имеют многочисленные особенности их изучения, осложняющие как постановку и проведение физического и математического моделирования, так и систематизацию получаемых данных и их последующее использование на практике. К этим особенностям относятся [4]: 1) многомасштабность; 2) многочисленность силовых факторов; 3) многочисленность столкновительных процессов; 4) многочисленность фазовых и химических превращений; 5) многочисленность безразмерных параметров и др. Ниже кратко описаны перечисленные здесь особенности двухфазных течений.

Однофазные течения характеризуются целым рядом пространственно-временных масштабов, определяемых скоростью потока, режимом течения (ламинарный, переходный, турбулентный), геометрией течения и др. [12, 17]. Для корректного моделирования движения дисперсной фазы необходимо учесть ее взаимодействия на разных масштабах, определяемых: 1) осредненным движением, 2) крупномасштабным пульсационным движением, 3) мелкомасштабным пульсационным движением, 4) различными неустойчивостями (например, Толлмина–Шлихтинга в пограничных слоях, Тейлора–Гертлера в трубах, Кельвина–Гельмгольца в слоях чистого сдвига) и т.д.

Для корректного интегрирования уравнений движения дисперсной фазы (частицы, капли, пузыри) необходимо учитывать большое количество силовых факторов (действующих сил). Перечислим здесь основные: 1) сила аэродинамического сопротивления, 2) силы тяжести (Архимеда), 3) сила Сэфмена, 4) сила Магнуса и многие другие. Необходимо отметить, что многие из указанных сил в том или ином виде содержат скорость

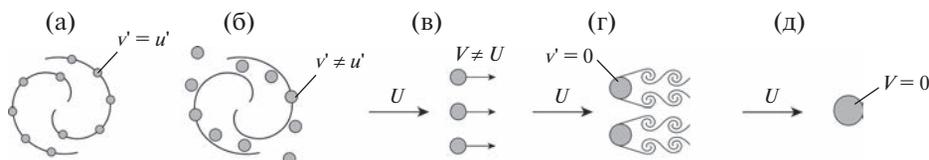


Рис. 1. Упрощенные топологические схемы двухфазных потоков различных классов в зависимости от инерции дисперсной фазы (частицы, капли) [12]: (а) – равновесное течение, (б) – квазиравновесное течение, (в) – неравновесное течение, (г) – течение с крупными частицами, (д) – обтекание неподвижной “замороженной” частицы.

несущей фазы, которая в турбулентном потоке является случайной величиной. Поэтому часто возникает вопрос о применимости полученного теоретическим или эмпирическим путем для других условий конкретного выражения для расчета силы (например, для ламинарного потока или в отсутствие сдвига скорости).

В двухфазных потоках могут иметь место различные столкновительные процессы [4]. К ним относятся взаимодействие дисперсных включений между собой (частица—частица, капля—капля, пузырь—пузырь), взаимодействие дисперсных включений с твердым телом, обтекаемым двухфазным потоком (частица—тело, капля—тело, пузырь—тело), а также взаимодействие дисперсной примеси со стенками, ограничивающими двухфазное течение (частица—стенка, капля—стенка, пузырь—стенка). Столкновительные взаимодействия могут приводить к процессам коагуляции и дробления, оказывающим значительное влияние на дисперсный состав примеси, а также на формирование пленок и ручейков на обтекаемых поверхностях. Таким образом, все вышеупомянутые столкновительные процессы играют существенную роль в формировании статистических характеристик движения частиц (капель, пузырей) и, следовательно, оказывают влияние на характеристики несущего их потока сплошной среды.

Необходимо отдельно отметить особую роль различных фазовых превращений в гидрогазодинамике и теплофизике двухфазных (многофазных) течений. Основные фазовые превращения хорошо известны: конденсация, затвердевание, плавление, испарение (кипение), сублимация.

Наличие фазовых превращений зачастую способствует “превращению” изначально однофазного течения в двухфазное и наоборот (рис. 2), а также приводит к переходу двухфазного течения из одного вида в другой. Например, образование пузырей в изначально однофазной жидкости происходит в процессе кипения, тогда как схлопывание (исчезновение) пузырей вследствие конденсации находящегося в них пара возвращает систему в однофазное состояние. Другим примером является плавление частиц в потоке газа, что приводит к переходу двухфазного потока “газ—твердые частицы” в течение “газ—капли”. Последующий процесс кристаллизации (затвердевания) капель

может стать причиной “возврата” течения в начальное состояние.

Процессы конденсации водяного пара на каплях ведут к изменению их размера и инерционности, что может являться причиной качественной перестройки структуры двухфазного потока. Испарение с поверхности движущихся капель также оказывает существенное влияние на характеристики движения как дисперсной фазы, так и всего двухфазного течения в целом.

Среди химических превращений особое место занимает горение. Колоссальное значение в самых различных технических применениях имеют процессы горения жидких капель и твердых частиц топлива. Отметим, что двухфазное горение может происходить по совершенно разным механизмам: жидкие топлива, как правило, сначала испаряются и далее происходит реакция окисления в пограничном слое (фронт реакции и граница раздела фаз различаются), тогда как горение твердых топлив происходит, как правило, гетерогенно (фронт горения и граница раздела фаз совпадают). Некоторые другие примеры химического реагирования, приводящие к переводу системы из однофазного состояния в двухфазное и наоборот: выделение пузырьков газа в жидкостях вследствие химической реакции, выпадение твердых частиц в жидкостях в виде осадка, растворение твердых частиц в жидкостях.

Сложность и множественность физических явлений и процессов, протекающих в двухфазных потоках, определяют появление большого количества дополнительных (по сравнению с однофазными течениями) безразмерных параметров (критериев). Перечислим лишь основные: 1) числа Рейнольдса частицы, капли и пузыря ( $Re_p$ ,  $Re_d$ ,  $Re_b$ ), построенные по диаметру дисперсной фазы и разнице скоростей (динамическому скольжению) между фазами; 2) числа Стокса в осредненном, крупномасштабном пульсационном и мелкомасштабном пульсационном движениях ( $Stk_f$ ,  $Stk_L$ ,  $Stk_K$ ); 3) столкновительные числа Стокса ( $Stk_c$ ,  $Stk_{cw}$ ), характеризующие инерционность дисперсной фазы по отношению к межчастичным столкновениям и столкновениям со стенкой канала; 4) число Вебера  $We$  и многие другие.



Рис. 2. Иллюстрация роли фазовых превращений при переходе системы из однофазного состояния в двухфазное и обратно [4].

Отметим, что при рассмотрении неизотермических двухфазных потоков необходимо введение соответствующих безразмерных параметров, характеризующих разницу температур (тепловое скольжение) между фазами и тепловую инерционность дисперсной фазы по отношению к соответствующим характерным временным масштабам изменения температуры несущей среды.

#### 4. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Этот раздел посвящен анализу имеющихся на сегодняшний день подходов математического моделирования двухфазных потоков, где в качестве дисперсной фазы выступают преимущественно твердые частицы или капли. Всем интересующимся вопросами прямого численного моделирования (DNS) турбулентных потоков с каплями и пузырями можно рекомендовать обзор [23].

##### 4.1. Метод прямого численного моделирования с разрешением межфазной границы

В англоязычной литературе этот метод называется “particle-resolved direct numerical simulation” (PR DNS). Метод PR DNS наиболее полно описывает сложную физику двухфазных потоков. Он предполагает разрешение обтекания каждой частицы. При этом ее поведение определяется как внешними действующими силами, так и силой аэродинамического сопротивления со стороны несущего газа, определяемой в процессе расчета. Необходимо отметить, что данный метод применим также к расчету более сложных двухфазных течений, несущих капли или пузыри, когда межфазная поверхность может деформироваться. Эта деформация рассчитывается с использованием аэродинамической силы, вычисляемой в процессе расчета.

Хорошо известным ограничением метода PR DNS является следующее обстоятельство. Рассчитать движение газа вокруг каждой частицы (капли, пузыря) возможно в том случае, когда шаг расчетной сетки мал по сравнению с размером дисперсной фазы. Применение этого метода осложняется, когда размер частиц (капель, пузырей) меньше размера наиболее мелких турбулентных вихрей (колмогоровский микромасштаб) и количество дисперсных включений велико. Сказанное приводит к необходимости дробления сетки на гораздо более мелкие ячейки, чем в случае прямого численного моделирования однофазного течения.

К настоящему времени разработаны различные численные методы и алгоритмы для реализации PR DNS. В одном из них используется сферическая расчетная сетка, располагаемая вокруг частиц и вложенная в декартову сетку для всей расчетной области. В [24] этот метод был использован для расчета силы, действующей на одиноч-

ную неподвижную частицу в затухающем однородном турбулентном потоке. Эффективными методами реализации PR DNS являются метод погруженных границ [25], в котором во всей расчетной области используется декартова сетка, и метод решеточных уравнений Больцмана [26], где также применяется невыровненная по форме частицы декартова сетка. Еще одним методом является Physalis [27], в котором используется локальное аналитическое решение для течения вокруг каждой частицы.

##### 4.2. Методы численного моделирования без разрешения межфазной границы (методы точечных частиц)

В англоязычной литературе эти методы называются “particle-point methods” (PP methods). PP-методы относятся к лагранжевым методам описания движения частиц. Эти самые старые методы можно использовать для расчетов движения миллионов частиц. Условием применимости лагранжевых подходов является малый размер частиц по сравнению с колмогоровским пространственным масштабом. В этом случае частицы могут рассматриваться как материальные точки.

Важнейшей характеристикой инерционности частиц является время динамической релаксации  $\tau_p$ . В случае малых значений  $\tau_p$  мгновенная скорость частицы близка к соответствующей скорости несущего газа и частицы являются трассерами. При этом реализуется равновесное течение (см. раздел 2). С увеличением  $\tau_p$  частицы не могут полностью отслеживать турбулентные пульсации газа, и реализуется квазиравновесное течение. В этом случае для описания движения частиц необходимо интегрировать уравнения их движения.

Лагранжевы модели могут иметь различный уровень описания турбулентности несущего газа от осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (RANS)), когда расчету подлежат только поля осредненных характеристик турбулентности, до метода крупных вихрей (large-eddy simulation (LES)) и прямого численного моделирования (direct numerical simulation (DNS)), когда разрешаются только крупные вихри и вихри всех масштабов (вплоть до колмогоровского) соответственно (рис. 3). Величина концентрации частиц предопределяет необходимый уровень описания межфазного взаимодействия (см. раздел 2): 1) режим движения одиночных частиц, когда их присутствие не оказывает обратного влияния на характеристики несущего газа (“one-way coupling”, OWC); 2) режим слабозапыленного течения с обратным влиянием частиц (“two-way coupling”, TWC) до 3) режима сильнозапыленного течения, когда существенную роль играют столкновения частиц между собой (“four-way coupling”, FWC).

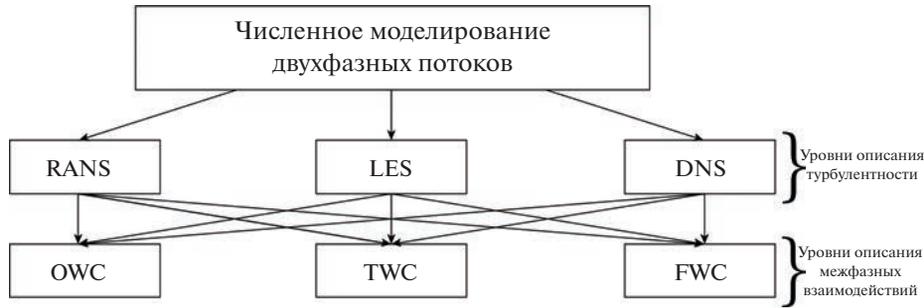


Рис. 3. Классификация методов численного моделирования двухфазных потоков в зависимости от иерархических уровней описания турбулентности несущей сплошной среды и межфазных взаимодействий [12].

#### 4.3. Прямое численное моделирование (результаты исследований)

В англоязычной литературе этот метод называется “direct numerical simulation” (DNS). К настоящему времени имеется значительное количество работ, в которых исследователи изучали различные проблемы физики двухфазных потоков с использованием DNS и описанием на различных уровнях межфазных взаимодействий и межфазной границы.

Одной из первых работ, в которой изучалось поведение точечных частиц (PP DNS) в затухающей однородной изотропной турбулентности (decaying homogeneous isotropic turbulence (DHIT)), была работа [28]. В этом исследовании изучалось движение 432 частиц при очень небольшом числе Рейнольдса ( $Re_\lambda < 35$ ). В уравнениях движения частиц учитывалось лишь линейное аэродинамическое сопротивление. В более поздних исследованиях [29, 30], посвященных изучению движения частиц, как в вынужденной однородной изотропной турбулентности (forced homogeneous isotropic turbulence (FHIT)), так и в затухающей однородной изотропной турбулентности (DHIT) акцент делался на изучение возможностей различных методов интерполяции (линейная интерполяция, интерполяция Лагранжа высокого порядка, эрмитова интерполяция) скорости газа в месте расположения частицы.

Более сложный случай турбулентного двухфазного потока – турбулентное течение в канале – рассмотрен в работах [31, 32]. В [31] помимо силы аэродинамического сопротивления учитывалась также сила Сэфмена, а в [32] для интерполяции скорости газа в месте нахождения частицы использован более совершенный псевдоспектральный метод интерполяции Фурье–Чебышева. К настоящему времени имеются многочисленные исследования двухфазных потоков методом PP OWC DNS в канале [33], трубах [34–36] и DHIT [37].

С ростом концентрации частиц они начинают оказывать обратное влияние на характеристики течения несущего газа (см. раздел 2), т.е. необхо-

димо проведение TWC DNS. Это осложняет моделирование. Во-первых, в уравнении движения частицы должна присутствовать не начальная (присущая однофазному потоку) скорость газа, а “новая” скорость возмущенного присутствием частиц потока. Различие между этими скоростями мало, если диаметр частиц меньше размера вычислительной сетки [38], т.е.  $d_p < L$ . Это условие в случае PP DNS практически всегда удовлетворяется. Во-вторых, необходимо вводить источник член в уравнениях движения газа [15]. Если частица меньше колмогоровского масштаба ( $d_p < \eta$ ), то особых проблем не возникает. В противном случае ( $d_p > \eta$ ) встает вопрос о применимости допущения точечных частиц.

Примерами исследований, в которых выполнено моделирование PP TWC DNS, являются работы [39–43]. В [39] изучено турбулентное течение в канале при  $\Phi \approx 10^{-4}$ . Найдено, что мелкие частицы ( $d_p < \eta$ ) подавляют турбулентность, а крупные частицы ( $d_p > \eta$ ), наоборот, вызывают интенсификацию турбулентности. В [40, 41] выявлено, что присутствие частиц снижает сопротивление и приводит к росту продольных пульсаций скорости газа. В [42] проведено моделирование двухфазного турбулентного потока в канале при учете нелинейности в законе сопротивления частиц (нестоксовы частицы). Найдено, что мелкие частицы увеличивали интенсивность турбулентности, напряжения Рейнольдса и вязкую диссипацию. В [43] изучено влияние монодисперсных субколмогоровских ( $d_p < \eta$ ) стоксовых ( $Re_p \ll 1$ ) частиц на затухание однородной изотропной турбулентности (HIT). В статье делался акцент на влияние числовой концентрации частиц. Выполненные расчеты позволили четко выделить два режима: 1) при  $Stk_K < 1$  присутствие частиц ведет к снижению затухания турбулентной энергии; 2) при  $Stk_K > 1$  частицы ускоряют затухание турбулентности.

В работе [44] приводятся результаты PR TWC DNS прямого турбулентного двухфазного восхо-

дящего потока в вертикальном канале. Изучено влияние числа Рейнольдса частицы ( $Re_p < 227$ ), размера частиц, объемного числа Рейнольдса, отношения плотностей фаз, отношения радиуса частиц к полуширине канала, объемной концентрации частиц на интенсивность пульсационной скорости несущей фазы. Выявлено, что критическое значение  $Re_p$ , при котором ламинаризирующее воздействие частиц сменяется на турбулизирующее увеличивается с ростом объемного числа Рейнольдса, размера частиц и отношения плотностей фаз, а также с уменьшением объемной концентрации частиц.

Дальнейший рост концентрации частиц приводит к необходимости учета межчастичных столкновений (см. раздел 2), т.е. необходимо проведение FWC DNS. Интенсивные столкновения частиц между собой оказывают влияние на статистику движения частиц и, следовательно, на степень их обратного влияния на течение газа. Сказанное сильно осложняет математическое моделирование. На сегодняшний день развито несколько стохастических подходов для того, чтобы уйти от простого детерминистского расчета парных столкновений частиц, требующего колоссальных затрат компьютерного времени.

Примерами исследований, в которых выполнено моделирование PP FWC DNS, являются работы [14, 16]. В [14] проведено математическое моделирование турбулентного двухфазного течения в вертикальной трубе в присутствии мелких тяжелых частиц в широком диапазоне изменения массовой концентрации ( $M = 0.1-30$ ) последних. Найдено, что результаты расчетов сильно зависят от используемой модели шероховатости. Также выявлено снижение интенсивности турбулентности с ростом массовой концентрации частиц. В [16] выполнено моделирование турбулентного двухфазного нисходящего течения в канале при массовой концентрации частиц  $M = 0.8$ . Расчеты проводились для гладкой и шероховатых стенок. Шероховатость моделировалась путем расположения на стенке фиксированных крошечных частиц. Обнаружено, что шероховатые стенки усиливают подавление турбулентности частицами.

#### 4.4. Метод крупных вихрей (результаты исследований)

В англоязычной литературе этот метод называется “large-eddy simulation” (LES). Метод LES похож на DNS, но используемая расчетная сетка намного крупнее. Мелкие вихри аппроксимируют подсеточной (subgrid-scale) моделью турбулентности. Самая распространенная используемая модель — модель Смагоринского [45]. Другие известные модели базируются на предположении

о масштабном подобию [46], разложении в ряд Тейлора [47] или использовании свертки [48].

Одной из первых работ, где был использован метод PP OWC LES, была работа [49]. В этой работе исследовалась дисперсия частиц для случая течения однородного сдвига. Авторы не применяли термин “LES”, но они рассматривали пространственно-осредненное уравнение Навье–Стокса для газа и использовали переменные (изменяемые по времени и пространству) коэффициенты для мелкомасштабных вихрей. Были выполнены расчеты всего для 48 пассивных частиц, причем влияние подсеточных масштабов на их движение не рассматривалось.

В работе [50] изучена дисперсия частиц в турбулентном потоке в трубе методами PP OWC LES и DNS при различных числах Рейнольдса. В уравнении движения частиц учитывались сила сопротивления, подъемная сила и сила плавучести. Вследствие очень низких значений объемной концентрации частиц их обратное влияние на газ и межчастичные столкновения не учитывались. Более того, влияние подсеточных масштабов скорости газа также не принималось во внимание. Основным выводом этой работы сводился к тому, что время динамической релаксации частиц играет важную роль в осаждении частиц.

В [51] изучено движение частиц в вертикальном канале методом PP OWC LES при очень малой объемной концентрации последних. В качестве подсеточной модели использовался подход динамической вихревой вязкости, ранее развитый в [52]. Сравнение полученных результатов с результатами моделирования на основе подхода DNS показало их хорошее соответствие.

В [53] выполнены расчеты двухфазного потока для случая вынужденной однородной изотропной турбулентности (FHIT) с учетом обратного влияния частиц на газ, т.е. с использованием метода PP TWC LES. Авторы применяли различные подсеточные модели к уравнениям движения несущего газа. Сделано заключение, что рост массовой концентрации ведет к снижению весовых коэффициентов в динамической модели вихревой вязкости.

Метод PP FWC LES использован для учета столкновений частиц в [54] для изучения двухфазного потока в вертикальном канале при  $\Phi = 1.4 \times 10^{-4}$ . Учитывалось влияние силы сопротивления, силы тяжести, а также подъемных сил. Для учета столкновений частиц использовалась детерминистская модель. Выявлено существенное влияние столкновений на статистические характеристики движения частиц.

В [55] методом PP FWC LES выполнены расчеты двухфазного потока в канале при  $\Phi = 1.3 \times 10^{-2}$  и учете только сил сопротивления и тяжести. Вы-

явлено, что частицы оказывают колоссальный эффект на турбулентность, приводя к утончению пограничного слоя, увеличению пульсаций скорости газа в продольном направлении и, наоборот, к снижению пульсаций газа в двух других направлениях.

В [56] рассчитаны параметры двухфазного потока в канале при  $\Phi = 4.8 \times 10^{-4}$ . Эффекты обратного влияния частиц на газ и межчастичные столкновения (PP TWC LES и PP FWC LES) рассматривались раздельно. Использовались различные модели столкновений частиц (модель твердых и мягких сфер), стенки (гладкая и шероховатая) и подсеточной вязкости (модель Смагоринского и динамическая модель). Расчеты показали, что различия при использовании разных столкновительных и подсеточных моделей незначительны, а учет столкновений частиц и шероховатости стенки приводит к лучшему соответствию с экспериментальными данными.

В [57] выполнено PP FWC LES-моделирование для двухфазного потока с частицами при  $\Phi = 7.3 \times 10^{-5}$ . Авторами была использована подсеточная модель, развитая ранее в [58], в уравнении движения для частиц, а также детерминистская модель для расчета межчастичных столкновений. Показано, что при такой незначительной объемной концентрации частиц их влияние на турбулентность газа пренебрежимо мало. В то же время обнаружено, что влияние столкновений частиц играет значительную роль. Авторы [57] позже выполнили PP FWC LES-расчеты турбулентного двухфазного потока [59] в горизонтальной трубе. Особенность этого исследования – учет полидисперсности частиц и их вращения, а также подъемной силы Сэфмена и силы Магнуса.

В [60] выполнено PP FWC LES двухфазного потока в канале при наличии эффектов агломерации частиц. Основным приемом, позволяющим учитывать появление в потоке агломератов частиц после их соударения, заключается во введении силы Ван-дер-Ваальса, отвечающей за явление когезии.

В заключение этого раздела обзора необходимо отметить бурное развитие алгоритмов численного моделирования, включающих новые подходы к построению сеток, например, в [61, 62].

## 5. ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ С ЧАСТИЦАМИ

В этом разделе описаны некоторые результаты исследований эффективных способов тепловой защиты энергодвигательных установок, работающих на твердом топливе, в том числе ракетных двигателей; смешения потоков в модельной камере сгорания с различными конфигурациями системы инъекции продуктов газификации энергетического конденсированного состава; газодинамического взаимодействия одиночной высокоинерционной

частицы с ударным слоем; электрофизических и акустических характеристик высокоэнтальпийного двухфазного потока; особенностей сажеобразования при горении переобогащенной кислород-метановой смеси; особенностей движения частиц в вихревых потоках; вклада энергии конденсации углеродных наночастиц в горение и детонацию газообразных углеводородов и др.

Одним из самых эффективных способов тепловой защиты камер сгорания энергодвигательных установок, работающих на твердом топливе, в том числе ракетных двигателей твердого топлива, является использование резиноподобных покрытий. Такие покрытия, подвергаясь нагреву под действием конвективных и радиационных тепловых потоков, разлагаются с поглощением значительной доли поступающего тепла [63–65]. При этом на поверхности теплозащитного покрытия формируется слой пористого коксового остатка, выполняющего функцию теплового сопротивления. В работе [66] проведено детальное экспериментальное исследование прочности прококсованного слоя типичного резиноподобного теплозащитного материала. На основе анализа экспериментальных результатов и их сопоставления с известными данными, полученными при имитации натуральных силовых нагрузок, установлен возможный диапазон изменения прочностных свойств прококсованного слоя для резиноподобной теплозащиты.

В [67] выполнены расчеты турбулентного пограничного слоя при наличии гомогенного реагирования в пограничном слое и гетерогенного реагирования на поверхности теплозащитного покрытия (ТЗП), результаты которых представляют значительный интерес. Данная задача возникает при определении скорости химического разрушения коксового остатка ТЗП при вдуве пиролизных газов, содержащих реакционно способные вещества.

В работе [68] построена физико-математическая модель квазистационарной абляции углеродного материала, учитывающая протекание всех основных сопутствующих физико-химических процессов. В качестве примера рассчитаны распределения параметров уноса массы углеродного материала по поверхности затупленного конуса. Учет влияния возникающих в результате абляции частиц при гиперзвуковом обтекании летательного аппарата выполнен в [69].

В недавно опубликованном обзоре [70] обобщены достижения отечественной и зарубежной науки в области разработки и улучшения характеристик углерод-углеродных и углерод-керамических композиционных материалов с акцентом на механические, окислительные и абляционные свойства. Описаны наиболее востребованные в настоящее время способы модифицирования матриц композитов и нанесения защитных покрытий с получе-

нием в структуре гетерофазных композиций на основе ультравысокотемпературных керамик. Проанализированы развитые математические модели для решения нелинейных задач теплопереноса, учитывающие различные физико-химические явления в структурно-неоднородных материалах. Особое внимание уделено учету эффектов асимметрии, конечной скорости и волновым явлениям при распространении тепла в анизотропных материалах.

Создание эффективных энергосиловых установок является важной и актуальной задачей в аэрокосмической, энергетической и технологической отраслях промышленности. В ряде случаев использование энергетических конденсированных составов (ЭКС) в качестве топлива позволяет обеспечить максимальные технические и эксплуатационные характеристики энергосиловых установок [71, 72]. Однако использование преимуществ ЭКС требует решения ряда проблем, в том числе оптимизации смешения с воздухом двухфазных продуктов газификации (ПГ) в камере сгорания (КС).

Для современных энергосиловых установок ПГ ЭКС являются смесью многокомпонентного газа и частиц конденсированной фазы. Как отмечено в работе [73], при оценке смешения в КС следует рассматривать как газообразные продукты газификации (ППГ), так и конденсированные продукты газификации (КППГ).

В [74] изложены критерии оптимизации, математическая модель и результаты расчетов смешения потоков в модельной камере сгорания с различными конфигурациями системы инъекции ПГ ЭКС. Усовершенствован ранее разработанный алгоритм обработки данных посредством введения вероятностного подхода при траекторной оценке распределения частиц дисперсной фазы в поперечных сечениях модельной КС малого удлинения. На рис. 4 показаны траектории движения кластеров частиц в проточном тракте модельной КС для случая, когда инъекция продуктов газификации осуществляется в донную часть наклонного пилона. Такой способ инъекции обеспечивает более высокую “пробивную” способность двухфазной струи, так как ПГ попадают в низкоскоростную область в следе за пилоном.

В результате проведенных параметрических исследований [74] предложены рекомендации в части повышения качества смешения ПГ с воздушным потоком в КС и минимизации интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта КС.

Наряду с непосредственным (ударным) воздействием частиц на обтекаемую поверхность летательного аппарата, приводящим к эрозионному износу, во многих случаях существенными оказываются эффекты, связанные с влиянием ча-

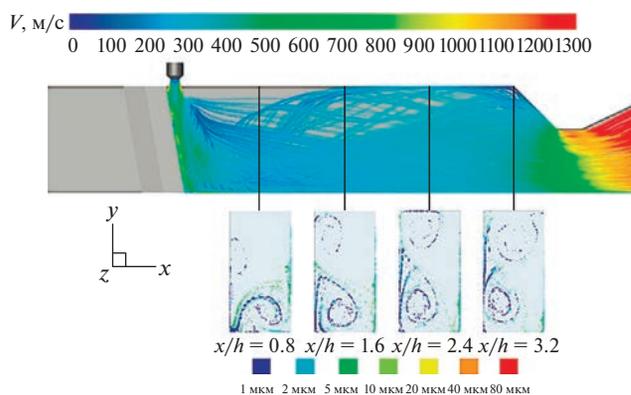


Рис. 4. Траектории движения кластеров частиц в проточной части модельной камеры сгорания [74]; траектории в продольном сечении окрашены в соответствии со скоростью движения частиц.

стиц на течение в ударном слое и интенсивность теплообмена. Среди этих эффектов можно отметить радиационный теплообмен между дисперсной фазой и обтекаемой поверхностью. Важным фактором является возможность интенсификации теплообмена между двухфазным потоком и обтекаемым телом. Отметим, что механизмы этого воздействия и его величина в значительной степени зависят от размера частиц. Наибольшие вопросы вызывает интенсификация теплообмена при обтекании тел двухфазными потоками с частицами крупных размеров, которые практически не тормозятся в ударном слое.

В [75, 76] представлены результаты численного моделирования газодинамического взаимодействия одиночной высокоинерционной частицы с ударным слоем. Детальным образом проанализирована эволюция ударно-волнового и вихревых течений, возникающих при переходе отраженной от обтекаемой поверхности частицы через головную ударную волну. Обнаружено, что существенную роль в формировании волновой структуры играет тороидальный вихрь, обтекание которого обуславливает отрыв приосевого набегающего потока, что создает условия для интенсификации конвективного теплообмена.

Несколько слов об еще одной важной проблеме. Началу разрушения газодинамического тракта ракетного двигателя предшествует появление в газовом потоке продуктов сгорания множества микрочастиц. Установлено, что они обладают электрическим зарядом, генерируют электрическое поле и могут быть зарегистрированы. Имеющиеся на сегодняшний день результаты легли в основу бесконтактной электростатической диагностики двигателей.

В [77] построена математическая модель генерации собственного электрического поля в системе “высокоэнтальпийный ионизированный поток —

стенка сопла” и проведены численные расчеты применительно к камере маршевого жидкостного ракетного двигателя. Определена электропроводность слабоионизированной плазмы продуктов сгорания топлива кислород + керосин. Выявлено, что при заданном потенциале стенки сопла 20–250 мВ интегральное значение тока на стенку составило 800–7500 мА в зависимости от режима истечения. Полученные численным путем значения напряженности и тока могут быть использованы при проведении диагностики рабочего процесса бесконтактным способом и построении алгоритма системы аварийной защиты двигателей новых поколений при испытаниях на стенде.

В [78] выполнены исследования электрофизических и акустических характеристик высокоэнтальпийного двухфазного потока при температурах в КС 3550–2900 К с твердыми частицами, попадающими в поток в результате эрозии вставки критического сечения сопла из углепластика. Скорость газового потока на срезе соответствовала числу Маха 1–2.2. Зарегистрированы электрофизические и акустические параметры двухфазного высокоэнтальпийного потока, а также вибрационные характеристики конструкции модельного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). С помощью датчика электрического поля установлено, что частицы углерода создают в струе избыточный отрицательный электрический заряд.

Корреляционный и спектральный анализ параметров магнитных и электрических полей продуктов сгорания углеводородного топлива, истекающих из сопла модельного ЖРД, с целью создания базы диагностических признаков систем измерения и регистрации, используемых при проведении испытаний, выполнены в [79].

В [80] проведены экспериментальные исследования особенностей сажеобразования при горении переобогащенной кислород-метановой смеси в двухзонном модельном газогенераторе при соотношении долей компонентов в диапазоне 0.4–1.0. С использованием визуализации внутрикамерного процесса во второй зоне газогенератора с помощью цветной цифровой видеосъемки и регистрации интенсивности излучения продуктов сгорания посредством фотосопротивления определены условия, при которых реализуется сажеобразование. Молекулярно-динамическое исследование влияния морфологии поверхности сажевых частиц на кинетику их роста проведено в [81].

В [82] выявлена существенная зависимость процесса распространения пламени от гетерогенных реакций промежуточных частиц. Результаты вносят заметный вклад в создание кинетических моделей гетерогенного самоускорения разветленно-цепных процессов и обнаружение новых типов распространения пламени.

Исследование особенностей движения дисперсной фазы (капель, частиц, осколков) в различных вихревых потоках представляет значительный интерес вследствие нескольких причин [83–85]. Во-первых, наличие дисперсной фазы визуализирует вихри [86, 87]. Во-вторых, измеряя скорость взвешенных дисперсных включений, можно получать необходимую информацию о динамике (полях скоростей) воздушного вихря. В-третьих, скрытые теплоты фазовых превращений (прежде всего, конденсации и испарения) при образовании (исчезновении) капель оказывают значительное влияние на процесс генерации, динамику и устойчивость торнадоподобных вихрей. В-четвертых, при определенных концентрациях дисперсная фаза может оказывать существенное влияние на характеристики атмосферного вихря и его поведение (вплоть до распада) [88–90]. В-пятых, присутствие осколков и других дисперсных включений может вносить решающий вклад в негативные последствия (разрушения и жертвы) торнадо.

В [91] выполнены измерения полей концентрации твердых частиц в окрестности критической точки цилиндрического тела с плоским торцом. Эксперименты выявили эффект значительного роста концентрации частиц вблизи поверхности тела, который проявляется сильнее с увеличением локальной концентрации частиц в набегающем турбулентном потоке.

Попытка измерения характеристик вихревого течения, формирующегося за крупной движущейся в турбулентном потоке частицей, предпринята в [92]. Измерения проведены с использованием PIV-метода, позволяющего фиксировать мгновенные поля скоростей.

В [93] выполнено моделирование закрученного двухфазного потока в коаксиальной камере сгорания с учетом столкновений частиц (PP FWC LES). Результаты расчетов хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными измерениями. Например, отчетливо отражаются эволюция когерентных структур и области рециркуляции, процесс периодического образования вихрей и их распад, более сильное перемешивание. Показано, что более сильное радиальное распространение частиц выгодно для стабилизации пламени.

В [94] экспериментально исследована гетерогенная плазма комбинированного разряда вихревого потока смеси аргона и водяного пара с частицами алюминия в трубке плазменного вихревого реактора. Для оценки электронной температуры, вращательной и колебательной температур возбужденных молекулярных комплексов, температуры металлических кластеров, электронной концентрации плазмы использованы спектральные методы. Проведено численное моделирование вихревого потока чистого водяного пара с частицами алю-

миния в присутствии источника нагрева. Получены пространственно-временные распределения параметров потока, таких как скорость, температура и давление, а также распределения молярных концентраций компонентов разрядной смеси.

В [95] рассмотрены механизмы вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде при наложении на него продольного магнитного поля. Показано, что даже в магнитных полях  $B > 1$  Тл влияние ионного увлечения не является пренебрежимо малым и его учет может приводить к более хорошему согласию с экспериментальными данными.

В [96] наиболее полно и детально описаны результаты изучения нового физического явления — детонационной волны конденсации, впервые обнаруженной по идеям академика В.Е. Фортова при химической конденсации нестабильных молекул за фронтом ударной волны. Впоследствии В.Е. Фортова заинтересовал вопрос о вкладе энергии конденсации углеродных наночастиц в горение и детонацию газообразных углеводородов, поскольку большинство этих процессов сопровождается образованием частиц конденсированного углерода. Известно, что теплота конденсации паров углерода в графит весьма велика и составляет около 720 кДж/моль. Работы по этому направлению ведутся в ОИВТ РАН в течение ряда лет.

В [97] представлена концепция диспергации жидких железных наночастиц, синтезированных при пиролизе пентакарбонила железа за падающими ударными волнами, которая позволяет объяснить зарегистрированное методом лазерной экстинкции аномальное падение оптической плотности конденсированной фазы при переходе через фронт отраженной ударной волны.

В [98] выполнен анализ влияния размеров и структуры сажевых частиц, синтезированных при горении в плоском предварительно перемешанном пламени углеводородов и при пиролизе за ударными волнами, на их оптические свойства. Необходимо отметить, что информация об оптических свойствах сажевых частиц необходима для построения климатических моделей, учитывающих поглощение солнечного света атмосферными аэрозолями и их осаждение на поверхностях ледников. Кроме того, данные об оптических свойствах сажи используются для расчета радиационного теплообмена в котлах, КС и других устройствах, в которых происходит процесс горения. Однако такие данные до сих пор не включены в известные базы данных по теплофизическим свойствам веществ. Проблема заключается в том, что оптические свойства сажевых частиц, синтезированных в различных условиях по температуре и давлению, времени реакции, а также при сгорании различных видов топлива, могут иметь существенные различия.

В работе [99] проанализированы результаты экспериментов, посвященных изучению кинетики пиролиза и сажеобразования при саморазложении ацетилена с различными добавками ацетона за ударными волнами при давлениях 3.5–4.5 бар, и выполнено кинетическое моделирование образования полиароматических углеводородов и роста сажи в этих смесях. Полученные результаты могут быть востребованы при разработке перспективных энергетических технологий, основанных на энергии саморазложения ацетилена, а также при анализе безопасности технологических процессов, связанных с использованием ацетилена.

Фотофоретическая сила может оказывать значительное влияние на процесс осаждения частиц в каналах тепло- и массообменников, на движение частиц в зонах просветления дисперсных систем и в окрестностях, вымывающих частицы. Ее можно использовать при проведении тонкой очистки небольших объемов газов, отборе аэрозольных проб, нанесении специальных покрытий заданной толщины из частиц и т.д.

Газ, взаимодействуя с неоднородно нагретой поверхностью, начинает двигаться вдоль поверхности в направлении возрастания температуры. Это явление называется тепловым скольжением газа, и оно вызывает появление фотофоретической силы. Под действием этой силы частица начинает двигаться. Наряду с фотофоретической силой на частицу действует сила вязкого сопротивления среды. Когда эти силы уравниваются, частица начинает двигаться равномерно с постоянной скоростью, которая называется фотофоретической скоростью.

В работе [100] впервые получены выражения, учитывающие вклад в “чистый” фотофорез (силу и скорость) крупной нагретой твердой сферической частицы конвективного переноса тепла. Разработанный метод решения конвективного уравнения теплообмена можно применить и для решения других аналогичных физических задач. В частности, для решения уравнения конвективной диффузии, задачи влияния конвективного тепло- и массообмена на процесс испарения нагретой капли и т.д.

Среди физических методов получения наночастиц с высокой локальной концентрацией энергии важное место занимают методы, основанные на использовании интенсивных ультразвуковых колебаний в жидких средах для синтеза и диспергирования наноматериалов [101]. Не менее распространенным является применение электрических разрядов в различных средах: дуга в газовой фазе, в электролитах и т.д. Обоим этим методам посвящено огромное число экспериментальных и теоретических работ отечественных и зарубежных исследователей. Данные работы нуждаются в обобщении и систематизации по типам и пара-

метрам воздействия, а также по составу и характеристикам получаемых наноматериалов.

В обзоре [102] рассмотрены физические методы получения наноразмерных материалов и структур в жидкофазных средах, характеризующиеся воздействием высоких энергий на вещество: синтез наноматериалов в плазме и под действием интенсивных ультразвуковых колебаний выше порога кавитации. Показано, что жидкофазные плазмохимические реакции в определенном смысле похожи на сонохимические реакции, поскольку оба этих вида процессов представляют собой локальную концентрацию высоких энергий в жидких реакционных средах.

В [103] рассмотрено влияние флуктуаций температуры среды на тепловую стабильность одиночных частиц с гетерогенными химическими реакциями, проходящими на внутренней пористой поверхности или на внешней поверхности частиц. Под тепловой стабильностью понимаются условия, когда частица не переходит в область высокой температуры, соответствующей диффузионной стадии горения. Постановка задачи [103] близка к современному бурно развивающемуся направлению исследований о влиянии случайных флуктуаций параметров среды на поведение систем с резко меняющимися параметрами. Этот класс задач актуален для микробиологии, генетики, передачи информации, экономики.

## 6. ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ С КАПЛЯМИ

В этом разделе описаны некоторые результаты исследований динамики капель на телах различной формы, обтекаемых газок капельными потоками; процессов коагуляции при соударении металлических частиц и капель полимера; процессов смешения пара, получаемого в водород-кислородных парогенераторах, с охлаждающей водой; дисперсионного состава капель, формообразования, развития и устойчивости факела распыла; распространения дисперсной примеси и теплообмена в закрученном турбулентном газок капельном потоке за внезапным расширением трубы; распространения акустических волн в многофракционных полидисперсных парогазок капельных смесях газа с твердыми частицами и др.

Одной из важнейших и нерешенных проблем авиации является обледенение летательного аппарата [104, 105]. Для борьбы с обледенением в настоящее время разработаны различные методы [106] для воплощения двух основных концепций. Реализация первой концепции призвана полностью противодействовать образованию льда, формирующегося на поверхности летательного аппарата. В англоязычной литературе эта концепция, а также методы и устройства для ее реализации получили название AIS (anti-icing systems). Вторая концепция призвана бороться с уже образовавшимся

льдом, предотвращая возможные негативные последствия. В англоязычной литературе эта концепция получила название DIS (de-icing systems).

Попадание самолета с включенной электроили воздушнотепловой противообледенительной системой в переохлажденное облако может привести к образованию так называемого барьерного льда, являющегося одной из самых неприятных форм обледенения. Такой лед получается вследствие кристаллизации капель воды, возникающих в результате распада ручейков или пленки, текущих по поверхности крыла. Кроме того, экспериментальные исследования [107], проведенные в аэродинамической трубе в условиях полета, показали, что капельный режим обледенения наблюдается чаще других.

Достаточно хорошо исследован случай капель, находящихся на вертикальной или наклонной плоскостях в неподвижном газе. Однако при высоких скоростях (характерных для авиации) изучение динамики капли осложняется наличием пограничного слоя, толщина которого соизмерима с размером капли и изменяется вниз по потоку. Отметим, что этот пограничный слой изобилует трехмерными и нестационарными структурами. Изучение гидротермодинамики капли с учетом ее охлаждения до температуры замерзания и ниже необходимо с целью корректного предсказания области возникновения барьерного льда.

В [108] проведены эксперименты на примере модельного профиля прямоугольного крыла. Предельный гистерезис угла смачивания, зависящий от свойств поверхности, был измерен методом наклонной плоскости. Также была разработана физико-математическая модель динамики капли на плоской поверхности в газовом потоке. В уравнении движения капли учтены силы, увлекающие каплю, а также силы адгезии и диссипативная сила внутреннего трения. Получены значения скорости потока, при которой начинается движение капли. Выявлены важные зависимости скорости капли от ее характерного размера и скорости воздуха. Развитый в работе экспериментально-теоретический алгоритм может быть использован при проведении экспериментов для намного более широкого диапазона определяющих параметров (размер капли, коэффициент поверхностного натяжения жидкости, скорость потока газа, предельный угол смачивания).

В [109] для предсказания мест отложения барьерного льда на поверхностях с различными углами смачивания проведены экспериментальные и теоретические исследования динамики и теплообмена капель, увлекаемых аэродинамической силой по поверхности модели. Разработанный численный код позволяет предсказать места при замерзания капель к поверхности и отследить начало процесса обледенения.

В [110, 111] экспериментально изучены некоторые эффекты, наблюдаемые при осаждении капель на модель с полусферическим торцом. Получены данные по скоростям и размерам как мелких (вторичные капли), так и крупных (осколки) капель в случае высокой (близкой к динамической температуре Лейденфроста) температуры модели. Выявлен эффект образования капель, имеющих околонулевые скорости вблизи поверхности модели, в результате коагуляции и обмена импульсом падающих и отраженных капель. Получены данные по снижению коэффициента восстановления скорости с ростом инерционности капель в случае их взаимодействия с криволинейными поверхностями. Обнаружен эффект несовпадения точек касания и отскока (отрыва) капель от поверхностей, усиливающийся с ростом размера капель.

Среди последних исследований иностранных авторов, посвященных проблеме обледенения летательных аппаратов, следует выделить работы [112–115].

Композиционные материалы широко применяются в технике [116]. Напыляемые на поверхность дисперсные композиционные материалы представляют собой интегрированные комплексы исходных материалов в каждой порошковой частице [116, 117]. Частица с интегрированными свойствами может быть получена путем конгломерации исходных компонентов в более крупную частицу в процессе осаждения мелкодисперсных частиц наполнителя на каплях термопластичного полимера при смешении двух дисперсных потоков с последующей полимеризацией композита [117]. Такой материал может напыляться на защищаемую поверхность для снижения трения и повышения износостойкости. Исходным материалом в этом случае является порошок, состоящий из частиц полимера, в которые внедрены частицы металла.

В [118] решена модельная задача о динамике коагулирующей смеси, состоящей из металлопорошка и капель полимера, движущихся в несущей среде во встречных направлениях с заданными на границах расчетной области скоростями без учета влияния электрического поля и турбулентности несущей среды. Предполагается, что при соударении металлической частицы и капли полимера происходит их коагуляция с образованием частицы металлополимера. При соударении разбрызгивания капли полимера не происходит, форма частицы металлополимера остается сферической, а объем увеличивается на объем частиц-доноров.

Использование водород-кислородных парогенераторов позволяет получать водяной пар очень высоких параметров (более 3000 К), который нельзя напрямую использовать в паротурбинном цикле. Главной особенностью этих парогенераторов является наличие организации охлаждения камер сгорания балластировочной водой, которая, смешиваясь с высокотемпературными продуктами сго-

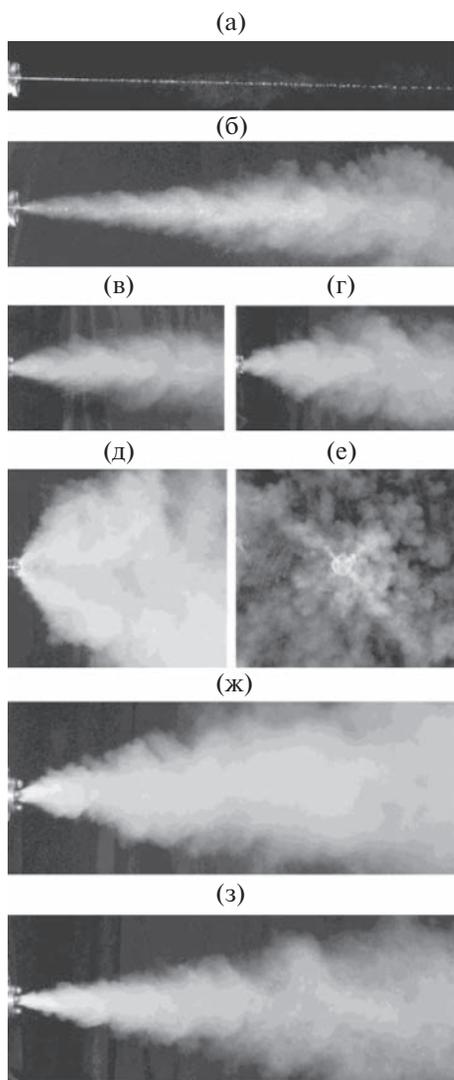
рания водорода в кислороде, обеспечивает нужный температурный уровень рабочего тела.

В [119, 120] выполнены расчеты процессов горения и теплообмена в водород-кислородной камере сгорания с использованием вычислительной гидрогазодинамики, учитывающей всю сложность тепловых и многофазных явлений. Проанализированы возможности имеющегося экспериментального оборудования по сжиганию водорода со смешением получаемого пара с охлаждающим компонентом — паром или водой. Приведены оригинальные результаты экспериментального испытания водород-кислородной камеры сгорания без смещения получаемого водяного пара с охлаждающим компонентом. Представлены методика и результаты определения степени недожога водорода в составе получаемого пара.

В обзоре [121] проанализированы основные типы и конструкции водородно-кислородных установок, таких как водородно-кислородные парогенераторы, пароперегреватели и воздухонагреватели различного уровня мощности. Определены основные проблемы, возникающие при разработке, создании и испытании таких установок, включая проблемы охлаждения наиболее теплонапряженных узлов, смешения и смесеобразования основных компонентов топлива и окислителя, смешения высокотемпературных продуктов сгорания и балластировочных компонентов, проблемы, связанные с полнотой сгорания водорода и обеспечения безопасности при работе. Подробно описаны основные области использования в стационарной и автономной энергетике, в том числе применение для повышения маневренности и эффективности электростанций с паровыми турбинами, в системах аккумулирования энергии для автономного энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии и другие.

В задачах регулируемого распыления до сих пор остаются не до конца изученными вопросы, связанные с дисперсионным составом капель, формобразованием, развитием и устойчивостью факела распыла вещества. Перегрев жидкости является одним из эффективных способов создания мелкодисперсной среды различной формы [122, 123], состоящей из капель субмикронного размера.

В [124] представлены результаты экспериментального исследования динамики вскипания струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через короткий канал квадратного сечения в атмосферу. Изучено изменение формы струи при различных степенях перегрева (рис. 5). При относительно невысоких температурах ( $T < 420$  К) сохраняется сплошное жидкостное ядро струи, как у холодной жидкости (рис. 5а). При увеличении интенсивности испарения с поверхности струи капиллярная неустойчивость Кельвина—Гельмгольца сменяется барокапиллярной неустойчивостью, жидкостная сердцевина разру-



**Рис. 5.** Изменение формы струи вскипающей воды при различных температурах [124]: (а) –  $T < 420$  К, (б) – 430, (в) – 440, (г) – 450, (д) – 460, (е) –  $475 < T < 540$  К (вид спереди), (ж) –  $540 < T < 570$  К, (з) – 580.

шается и струя приобретает коническую форму, состоящую преимущественно из крупных капель (рис. 5б). Дальнейший перегрев приводит к более интенсивному рождению, росту и взаимодействию паровых пузырьков, что находит отражение в монотонном увеличении угла факела распыления (рис. 5в–5д). Обнаружен эффект полного развала струи – конус с развернутым углом раскрытия (рис. 5е). Также выявлена потеря устойчивости полного раскрытия струи при температуре  $T = 540$  К. Для различных режимов вскипания в безразмерных координатах получена зависимость изменения угла раскрытия струи от степени перегрева рабочей жидкости.

Измерения полей скорости в факеле распыла форсунки, а также диспергированного потока по радиусу капель выполнены в [125]. Исследование

проведено с целью нахождения режимов максимальной теплоотдачи между охлаждаемой стенкой и диспергированным потоком теплоносителя в высоконагруженных перспективных термоядерных установках.

Необходимо отметить работы российских авторов, посвященных изучению структуры и свойств перспективных мультикомпонентных (композиционных) топлив. Созданы эффективные экспериментальные методики, позволяющие проводить независимые измерения содержащихся в струях твердых частиц, капель горючих и негорючих компонентов, пузырьков воздуха и паров [126–128]. Это стало возможным благодаря комбинации современных оптических методов.

В работе [129] поставлена и решена задача о циклическом напылении высокотемпературного аэрозоля на пластину с образованием теплозащитного материала. Предложен оригинальный способ аналитического решения сложной задачи теории теплопроводности с циклически возрастающей за счет напыления высокотемпературного аэрозоля толщиной пластины путем применения конечного интегрального косинус-преобразования Фурье. Получено аналитическое решение, на основе которого проведены расчеты существенно нестационарных температурных полей. Выявлен сложный характер теплопереноса с пиковыми максимумами и минимумами, огибающие кривые которых являются гладкими с выраженными максимумами.

Однофазные закрученные (вихревые) потоки характеризуются большими локальными градиентами осредненных и пульсационных скоростей, определяемых сложными гидродинамическими явлениями вследствие действия центробежной силы, радиального градиента давления и силы Кориолиса [130–132]. Вихревые двухфазные течения в условиях внезапного расширения трубы или канала широко используются для стабилизации процесса горения в промышленных горелочных устройствах и сепараторах. Формирующееся рециркуляционное течение, вызванное внезапным расширением или принудительной закруткой, оказывает определяющее влияние на интенсивность процессов переноса теплоты и распространение дисперсной фазы.

В [133] рассмотрена задача о численном моделировании динамики распространения дисперсной примеси и теплообмене в закрученном турбулентном газок капельном потоке за внезапным расширением трубы. Газовая фаза описывается системой 3D RANS-уравнений с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в несущей фазе. Турбулентность газовой фазы рассчитывается по модели переноса рейнольдсовых напряжений. Эйлерово и лагранжево описания дают качественно близкие результаты для небольших капель (с начальным диаметром до 30 мкм), и толь-

ко для самых крупных исследованных в данной работе капель с начальным диаметром 100 мкм отличие в результатах расчетов превышает 15%.

В [134] в рамках квазиодномерной модели установлены некоторые важные особенности течения двухфазной парокропальной среды в канале переменного сечения типа сопла Лавала при наличии межфазных превращений. Получена формула для полного импульса потока смеси, показывающая, что в суживающейся части сопла полный импульс уменьшается, а в расширяющейся части, наоборот, увеличивается. Представлен способ расчета предельной термодинамически равновесной смеси (когда скорости и температуры фаз совпадают) с учетом переменного фазового состава.

Газовзвеси, аэрозоли и туманы представляют собой многофазные системы, имеющие достаточно регулярную структуру и состоящие из двух фаз, одна из которых – жидкие капли или твердые частицы. Такие среды широко встречаются в природе и часто являются основными рабочими телами в технологических процессах [135]. Исследование волновых процессов в таких средах представляется актуальной проблемой динамики многофазных сред, основы которой, а также ряд приложений изложены в [136]. Колебательные процессы в двухфазных ограниченных средах подробно рассматриваются в [137, 138]. Немаловажно отметить, что воздействие нелинейных колебаний, особенно в резонансных режимах, на многофазные среды в трубах весьма разнообразно и вызывает не только всевозможные периодические движения, но и нелинейные эффекты. Среди таких эффектов – турбулизация потока, возникновение ударных волн, вторичных течений и акустотермических процессов, генерация высших гармоник, образование пульсирующей струи во внешнем волновом поле вблизи открытого конца, коагуляция и осаждение капель и частиц [139], которые имеют определяющее влияние на динамику среды. Применение волновых технологий позволяет на принципиально новом уровне решать различные прикладные задачи. Одной из таких задач является очистка воздуха от взвешенных жидких или твердых частиц, образовавшихся при горении топлива, химическом взаимодействии газов, конденсации и осаждении паров (нефтяные дымы, туманы смол, пары воды и других жидкостей в теплотехнических установках, в частности в градирнях) или при измельчении твердых тел (размалывание, дробление, транспортировка).

В [140] изучено распространение акустических волн в многофракционной полидисперсной парогропальной смеси газа с твердыми частицами. Описана замкнутая система интегродифференциальных уравнений движения смеси газа с паром, каплями и твердыми частицами. Получено дисперсионное соотношение, и рассчитаны дисперсионные кривые. Проанализировано влия-

ние межфазного массообмена на распространение и затухание акустических волн. Установлено, что при моделировании с учетом межфазного массообмена затухание волн больше, а скорость распространения звука в рассматриваемой смеси меньше при низких частотах. Показано влияние учета многофракционности смеси на распространение и затухание акустических волн в воздушном тумане с примесями частиц разных сортов.

В [141, 142] исследованы нелинейные колебания вблизи резонансной частоты аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением. Представлены зависимости размаха колебаний давления среды от числа Рейнольдса. Установлено, что при резонансе уменьшение концентрации аэрозоля в трубе происходит в 12 раз быстрее, чем в отсутствие колебаний. Приводится сравнение результатов с экспериментальными данными для однородных труб.

Влияние фазовых превращений на распространение импульса давления различной начальной формы в парогропальной смеси с полидисперсными каплями воды, частицами песка и алюминия изучено в [143]. Выявлено, что учет фазовых превращений приводит не только к более сильному затуханию импульса давления всех рассматриваемых форм как в плоском, так и в сферическом и цилиндрическом случаях, но и к более значительному изменению первоначальной формы.

Выделим также обзорную работу [144] того же коллектива авторов. В обзоре рассмотрены результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований динамики различных газовзвесей и отдельных частиц в волновых полях резонаторов разнообразных форм и размеров. Описаны эффекты, возникающие при колебательных процессах в многофазных средах, такие как коагуляция и осаждение аэрозоля в резонансных режимах и в режиме высокоинтенсивного ультразвукового воздействия. Приводятся методы захвата, фокусировки и разделения частиц. Дается анализ механизма взаимодействия и основных сил с учетом акустических течений при дрейфе частиц в волновом поле.

В [145] проанализировано влияние изменяющегося в процессе коагуляции фракционного состава газовзвеси, заполняющей акустический резонатор, на характеристики колебаний несущей среды и дисперсных фракций при фиксированной частоте внешнего возбуждения. Отметим, что продольные колебания в резонаторе создаются поршнем, перемещающимся по гармоническому закону с постоянной частотой и амплитудой. Найдено, что изменение дисперсности фракций, происходящее в результате коагуляции капель, меняет резонансную частоту системы и характер колебаний при фиксированной частоте колебаний поршня.

Зачастую образование капель происходит при процессах абляции металлов и плавлении метал-

лических образцов. В [146] описаны результаты детального экспериментального изучения процесса образования капель при плавлении металла в высокочастотном индукторе.

Из всех свойств нанокapель особое место занимают поверхностные характеристики (поверхностное натяжение, поверхностная энергия, свободная поверхностная энергия) и их зависимость от размера. Размерные зависимости многих других свойств часто объясняются изменением данных характеристик. В [147] в рамках термодинамики двухфазной системы с искривленной поверхностью получено уравнение размерной зависимости поверхностного натяжения капли сферической формы на границе с паром с учетом влияния на температуру фазового равновесия. Проведены численные расчеты для жидких нанокapель ряда металлов. Установлено немонотонное изменение поверхностного натяжения при уменьшении радиуса поверхности натяжения: возрастание в области больших размеров и уменьшение в области малых.

Охлаждение двухфазными аэрозольными потоками в последнее время является объектом пристального внимания со стороны исследователей. Это связано с широкой областью применения: от создания современного теплообменного оборудования для энергетики, химической промышленности до разработки высокоэффективных систем термостабилизации и охлаждения компонентов электронного оборудования, ракетных сопел, использования в металлургии и т.д.

В [148] продемонстрирована возможность измерения поля температур, размеров капель жидкости и приведены картины орошения теплообменной поверхности при аэрозольном охлаждении с использованием высокоскоростных ИК-термографии, визуализации и прозрачного нагревательного элемента. Получены оригинальные опытные данные по интенсивности теплообмена. Показано, что коэффициенты теплоотдачи при аэрозольном охлаждении в 1.5 раза выше максимальной теплоотдачи при мультиструйном орошении. При этом расход жидкости для аэрозольной форсунки практически в пять раз ниже расхода жидкости при использовании мультиструйной форсунки.

Среди последних работ иностранных авторов выделим работы, посвященные изучению особенностей испарения капель при высоких числах Вебера [149] и взаимодействия капель со стенкой [150, 151].

## 7. ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ С ПУЗЫРЬЯМИ

В этом разделе описаны некоторые результаты исследований интенсификации теплоотдачи при пузырьковом кипении; механизма формирования крупных паровых агломератов при кипении недогретой воды в канале; развития детонационных волн в пузырьковой жидкости; распростра-

нения акустических волн в сложных слоистых средах, содержащих пузырьковую жидкость; механизмов развития электрических разрядов переменного тока в газожидкостной среде с пузырьковой структурой и др.

В [152] представлен детальный обзор современных исследований по интенсификации теплообмена с использованием передовых пассивных и полупассивных методов интенсификации. Детально описаны и проанализированы исследования по интенсификации кипения и испарения с использованием коммерческих поверхностей, а также перспективных разработок, полученных различными способами модификации: как механическими (деформирующее резание, применение сеточных покрытий и т.д.), так и более ресурсоемкими современными методами и их комбинациями, применяемыми при создании мультимасштабных, бифильных и прочих микро- и наноструктурированных поверхностей и покрытий. В частности, в [152] сделан вывод, что максимальные подтвержденные в различных исследованиях значения коэффициента теплоотдачи наблюдаются на трехмерных поверхностях с полузакрытыми полостями ("reentrant cavities"), интенсификация пузырькового кипения на которых связана с повышением плотности центров парообразования и снижением температурных напоров закипания и интерпретируется с помощью физических моделей, рассматривающих циклический процесс роста и отрыва пузырька, формирующегося в полузакрытой полости.

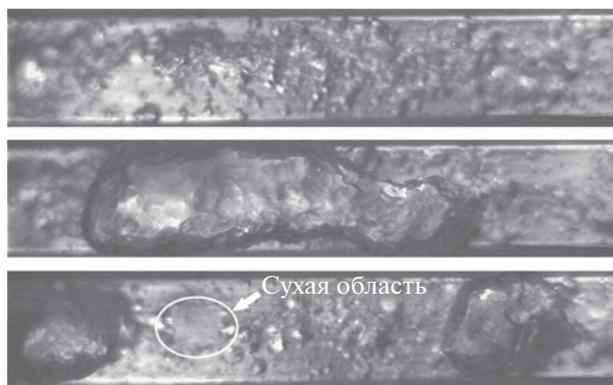
Образование пузырей в изначально однофазной жидкости происходит в процессе кипения. Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения, широко применяется в технологических процессах, связанных с отводом высоких, в том числе экстремальных, тепловых потоков. Такое поверхностное кипение используется в ракетно-космической технике, пучковых технологиях, металлургии, импульсных МГД-установках. Реализуемые коэффициенты теплоотдачи для воды могут достигать сотен кВт/(м<sup>2</sup> К) и значительно превышать аналогичные характеристики, достигаемые другими методами теплообмена. Так, рекордная плотность критических тепловых потоков с недогретой до температуры насыщения водой составляет 276 МВт/м<sup>2</sup> [153].

Необходимо отметить, что при рассмотрении кипения воды, недогретой до температуры насыщения, предполагается кипение дегазированной (деаэрированной) жидкости. Иначе выделение большого количества растворенного в ней газа и его накопление в отдельных областях пространства при повышении температуры (снижении недогрева воды) могут приводить к аварийным ситуациям [154].

В работе [155] приводятся экспериментальные данные по кипению недогретой воды в условиях

вынужденного течения на поверхностях, сформированных методом микродугового оксидирования и осаждением наночастиц  $Al_2O_3$  из кипящей наножидкости. Большой недогрев кипящей жидкости и ее глубокая деаэрация полностью деактивируют действующие центры парообразования после конденсации (схлопывания парового пузыря). Выявлено, что сильный недогрев жидкости ( $30-76^\circ C$ ) и хорошая смачиваемость структурированной поверхности обеспечивают интенсивную деактивацию и приводят к хаотическому распределению центров парообразования во времени. Характерный размер паровых пузырей составил около  $200-250$  мкм, продолжительность жизни пузырей –  $200-500$  мкс. Применение покрытия, образованного методом микродугового оксидирования, увеличивало теплоотдачу на  $20-30\%$ .

В работе [156] выполнено экспериментальное исследование механизма формирования крупных паровых агломератов при кипении недогретой воды в канале при приближении плотности теплового потока к критической на гладких и структурированных поверхностях нагрева. Эксперименты проводились на дистиллированной деаэрированной воде при атмосферном давлении и недогревах до температуры насыщения  $\Delta t_n = 20-75^\circ C$  в диапазоне массовой скорости от  $500$  до  $900$  кг/(м<sup>2</sup> с). Показано, что крупные агломераты образуются в результате спонтанного слияния обычных мелких паровых пузырей при достаточно высокой заселенности ими поверхности нагрева. Наличие паровых агломератов создает условия для возникновения на греющей поверхности сухих областей (рис. 6), прогрессирующее расширение которых является непосредственной причиной перегрева теплоотдающей поверхности и кризиса кипения. Влияния структурирования поверхности нагрева (кипения) методом микродугового оксидирова-



**Рис. 6.** Образование сухой области [156] при пролете парового агломерата при  $\Delta t_n = 43^\circ C$  и массовой скорости  $660$  кг/(м<sup>2</sup> с); движение жидкости справа налево; интервал между кадрами –  $6.5$  мс, размер кадров –  $3.5 \times 17.9$  мм<sup>2</sup>.

ния на значения режимных параметров в момент появления агломератов не обнаружено.

Детонация – явление универсальное. Детонационные волны (ДВ) существуют в разнообразных гомогенных и гетерогенных средах. Отметим, что детонация в пузырьковых средах – уникальное явление, так как волны пузырьковой детонации способны существовать в системах с чрезвычайно низким энергосодержанием. Обладая общими для всех волн детонации признаками (это самоподдерживающийся автоволновой стационарный процесс), волна пузырьковой детонации имеет ряд особенностей, проявляющихся в структуре, свойствах и механизме распространения [157–160].

Существование ДВ в жидкости с пузырьками горючего газа обусловлено энергосодержанием при воспламенении и последующем расширении газовых пузырьков. Сказанное обеспечивает поддержание режима “пузырьковой” детонации и компенсирует диссипацию энергии волны при ее распространении в “энергорассеивающей” пузырьковой среде.

Среди последних работ, посвященных изучению ДВ в пузырьках, отметим исследования [161–163]. Объект изучения – газожидкостная система, содержащая равномерно распределенные по объему жидкости одинаковые по размеру пузырьки с горючим газом (например, смесь ацетилена с кислородом). Уравнение сохранения импульсов используется с учетом относительного движения фаз. Модель основывается на допущении, что при распространении волновых возмущений в среде пузырьки газа не дробятся и не слипаются.

В работе [161] на основе теоретической модели, учитывающей относительное движение фаз в среде, изучаются процесс взаимодействия встречных детонационных волн в пузырьковой жидкости и их трансформация в постдетонационные волны. На основе численного эксперимента изучены динамика и взаимодействие встречных ДВ в химически активной пузырьковой жидкости. Отчетливо показано, что в точке столкновения ДВ в жидкости реализуются кратковременные пиковые давления, в несколько раз превышающие амплитуду самих ДВ. Это может стать причиной разрушения элементов технологических конструкций, расположенных в непосредственной близости от зоны контакта волн. Выявлено, что величина пиковых давлений определяется начальными параметрами пузырьковой среды и нелинейно возрастает с увеличением объемного содержания газовой фазы.

Процессы отражения и преломления ДВ при переходе границы “пузырьковая жидкость–чистая жидкость”, расположенной под углом к фронту ДВ, рассмотрены в [162]. Установлено, что при отражении ДВ от наклонной границы происходит увеличение ее амплитуды, обусловленное переходом волны в акустически более жесткую среду. Пока-

зано, что в результате интерференции падающей и отраженной волн формируется волновое движение вдоль границы с увеличивающейся амплитудой результирующей волны. Увеличение угла наклона приводит к росту максимального значения амплитуды давления, достигающей экстремума при угле наклона около  $45^\circ$ .

В работе [163] на основе численного эксперимента исследована возможность возбуждения ДВ в химически активной пузырьковой жидкости волнами малой амплитуды, которые при обычных условиях не способны инициировать пузырьковую детонацию. Показано, что один из таких способов — предварительное снижение давления на границе жидкости с последующим воздействием на среду волной сжатия. В этом случае амплитуда воздействующего импульса давления, способного инициировать ДВ в пузырьковой системе, может быть в несколько раз меньше критической амплитуды, обеспечивающей пузырьковую детонацию в “обычных” условиях.

Распространение акустических волн в сложных средах является предметом активных исследований. Особенный интерес представляет слоистая среда, содержащая пузырьковую жидкость. Это связано как с природными, так и с технологическими процессами.

В [164] рассмотрена задача прохождения акустического сигнала через трехслойную среду “вода—пузырьковая жидкость—вода”. Дисперсная фаза пузырьковой жидкости содержала паровоздушные пузырьки (радиус — 2 мм), пузырьки углекислого газа с паром (радиус — 1 мм) и гелиевые пузырьки (радиус — 1.5 мм). Обнаружено, что минимум коэффициента прохождения и максимум коэффициента отражения наблюдаются в области резонансной частоты пузырьков. Это означает, что на данной частоте пузырьковый слой почти полностью отражает падающую акустическую волну. Кроме того, три фракции с разными начальными радиусами дисперсной фазы приводят к появлению для этих коэффициентов трех локальных минимумов и максимумов. Это связано с разницей в значениях резонансных частот собственных колебаний пузырьков каждой из фракций.

В работах [165, 166] выведено модифицированное уравнение Релея—Ламба, учитывающее радиальные колебания пузырька газа, покрытого вязкоупругой оболочкой, на внутренней поверхности которой распределен тонкий слой жидкости. Для случая малых возмущений найдено дисперсионное уравнение, учитывающее межфазный теплообмен между газом, жидкой прослойкой, вязкоупругой оболочкой и несущей жидкостью. Покрытые упругой оболочкой пузырьки встречаются во многих областях. Но основное применение они нашли в биомедицине, где используются в качестве контрастных веществ для ультразвуковой диагностики.

Коллапс парогазовых пузырьков в жидкости зачастую сопровождается излучением ударно-волновых импульсов, расходящихся в жидкости от поверхности пузырька [167]. Указанные импульсы могут как наносить вред, способствуя кавитационному повреждению насосов, клапанов, мембран, лопаток гидротурбин, так и быть полезными, способствуя очистке твердых поверхностей от загрязнений, интенсификации сонохимических реакций и т.д.

В [168] изучены особенности отклика пузырьков в сферических кластерах на однократный импульс разрежения. Выявлен ряд особенностей, вызванных коллективным поведением пузырьков и связанных со скоростью затухания колебаний давления и частотой колебаний.

Исследования электрических разрядов переменного тока в газожидкостной среде с пузырьковой структурой имеет большой практический и научный интерес. Газожидкостные среды и течения представляют, как правило, двухфазную систему “газ—жидкость”, с помощью которой можно решить многие промышленные, бытовые и экологические проблемы. В [169] представлены результаты экспериментальных исследований электрического разряда переменного тока ( $f = 50$  Гц) в газожидкостной среде электролита с пузырьками для межэлектродных расстояний 50—150 мм внутри диэлектрической трубки. Наличие пузырьковой структуры с микрозарядами влияет на характер пульсаций тока и напряжения разряда. Установлен частотный спектр колебаний напряжения и тока разряда с использованием быстрого преобразования Фурье. На основе анализа экспериментальных данных установлен механизм развития электрического разряда переменного тока в среде с микропузырьками.

В [170] изучена кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза. Предложен оригинальный численный алгоритм, позволяющий находить скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с заданными экспериментальными данными по выходу, а также рассчитывать концентрации веществ, участвующих в приэлектродных процессах, на конкретные моменты времени. Проведено численное моделирование приэлектродных процессов функционирующего электролизера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены проблемы и особенности изучения течений сплошных сред, содержащих дисперсную примесь в виде твердых частиц, капель или пузырей. Представлены современные методы математического моделирования двухфазных потоков, описывающие на различном иерархическом уровне межфазную границу, межфазные взаимодействия и турбулентность несущей сплошной среды.

Описаны некоторые результаты последних исследований двухфазных потоков и возможности их использования для решения широкого круга прикладных задач.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00734.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.
2. *Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. М.—Ижевск: Ин-т компьютер. иссл., 2005. 504 с.
3. *Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N.* Tornado. N.Y.: Begell House. 2015. 394 p.
4. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
5. *Owen P.R.* Pneumatic Transport // J. Fluid Mech. 1969. V. 39. Pt. 2. P. 407.
6. *Барановский С.И.* Особенности высокоскоростных двухфазных газожидкостных струй // Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента. Таллин, 1985. С. 60.
7. *Зайчик Л.И., Першуков В.А.* Проблемы моделирования газодисперсных турбулентных течений с горением или фазовыми переходами (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 5. С. 3.
8. *Crowe C.T.* Review – Numerical Models for Dilute Gas Particles Flows // Trans. ASME. J. Fluids Eng. 1982. V. 104. № 3. P. 297.
9. *Elghobashi S.* Particle Laden Turbulent Flows: Direct Simulation and Closure Models // Appl. Sci. Res. 1991. V. 48. P. 301.
10. *Gore R.A., Crowe C.T.* Effect of Particle Size on Modulating Turbulent Intensity // Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. № 2. P. 279.
11. *Gore R.A., Crowe C.T.* Modulation of Turbulence by a Dispersed Phase // Trans. ASME. J. Fluids Eng. 1991. V. 113. № 2. P. 304.
12. *Varaksin A. Y., Ryzhkov S. V.* Mathematical Modeling of Gas–Solid Two-phase Flows: Problems, Achievements, and Perspectives (A Review) // Mathematics. 2023. V. 11. P. 3290.
13. *Elghobashi S.* On Predicting Particle-Laden Turbulent Flows // Appl. Sci. Res. 1994. V. 52. P. 309.
14. *Vreman A.W.* Turbulence Characteristics of Particle-laden Pipe Flow // J. Fluid Mech. 2007. V. 584. P. 235.
15. *Eaton J.K.* Two-way Coupled Turbulence Simulations of Gas–Particle Flows Using Point-Particle Tracking // Int. J. Multiph. Flow. 2009. V. 35. P. 792.
16. *Vreman A.W.* Turbulence Attenuation in Particle-laden Flow in Smooth and Rough Channels // J. Fluid Mech. 2015. V. 773. P. 103.
17. *Varaksin A. Y., Ryzhkov S. V.* Turbulence in Two-phase Flows with Macro-, Micro-, and Nanoparticles: A Review // Symmetry. 2022. V. 14. P. 2433.
18. *Saffman P.G., Turner J.S.* On the Collision of Drops in Turbulent Cloud // J. Fluid Mech. 1956. V. 1. P. 16.
19. *Wang L.-P., Wexler A.S., Zhou Y.* On the Collision Rate of Small Particles in Isotropic Turbulence. I. Zero-inertia Case // Phys. Fluids. 1998. V. 10. P. 2647.
20. *Wang L.-P., Wexler A.S., Zhou Y.* Statistical Mechanical Description and Modelling of Turbulent Collision of Inertial Particles // J. Fluid Mech. 2000. V. 415. P. 117.
21. *Kuerten J.G.M., Vreman A.W.* Effect of Droplet Interaction on Droplet-laden Turbulent Channel Flow // Phys. Fluids. 2015. V. 27. Paper 053304.
22. *Вараксин А.Ю.* Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
23. *Elghobashi S.* Direct Numerical Simulation of Turbulent Flows Laden with Droplets of Bubbles // Annu. Rev. Fluid Mech. 2019. V. 51. P. 217.
24. *Burton T.M., Eaton J.* Fully Resolved Simulations of Particle–Turbulence Interaction // J. Fluid Mech. 2005. V. 545. P. 67.
25. *Picano F., Breugem W.P., Brandt L.* Turbulent Channel Flow of Dense Suspensions of Neutrally-buoyant Spheres // J. Fluid Mech. 2015. V. 764. P. 463.
26. *Ten Cate A., Derksen J.J., Portela L.M., van den Akker H.E.A.* Fully Resolved Simulations of Colliding Monodisperse Spheres in Forced Isotropic Turbulence // J. Fluid Mech. 2004. V. 539. P. 233.
27. *Takagi S., Oguz H.N., Zhang Z., Prosperetti A.* Physalis: A New Method for Particle Simulation: Part II: Two-dimensional Navier–Stokes Flow Around Cylinders // J. Comput. Phys. 2003. V. 187. P. 371.
28. *Riley J.J., Patterson Jr.G.S.* Diffusion Experiments with Numerically Integrated Isotropic Turbulence // Phys. Fluids. 1974. V. 17. P. 292.
29. *Yeung P.K., Pope S.B.* An Algorithm for Tracking Fluid Particles in Numerical Simulation of Homogeneous Turbulence // J. Comput. Phys. 1988. V. 79. P. 373.
30. *Balachandar S., Maxey M.R.* Methods for Evaluating Fluid Velocities in Spectral Simulations of Turbulence // J. Comput. Phys. 1989. V. 83. P. 96.
31. *McLaughlin J.B.* Aerosol Particle Deposition in Numerically Simulated Channel Flow // Phys. Fluids. 1989. A1. P. 1211.
32. *Kontomaris K., Hanratty T.J., McLaughlin J.B.* An Algorithm for Tracking Fluid Particles in a Spectral Simulation of Turbulent Channel Flow // J. Comput. Phys. 1992. V. 103. P. 231.
33. *Marchioli C., Soldati A., Kuerten J.G.M., Arcen B., Taniere A., Goldensoph G., Squires K.D., Cargnelutti M.F., Portela L.M.* Statistics of Particle Dispersion in Direct Numerical Simulations of Wallbounded Turbulence: Results of an International Collaborative Benchmark Test // Int. J. Multiph. Flow. 2008. V. 34. P. 879.
34. *Marchioli C., Giusti A., Salvetti M.V., Soldati A.* Direct Numerical Simulation of Particle Wall Transfer and Deposition in Upward Turbulent Pipe Flow // Int. J. Multiph. Flow. 2003. V. 29. P. 1017.
35. *Van Esch B.P.M., Kuerten J.G.M.* Direct Numerical Simulation of the Motion of Particles in Rotating Pipe Flow // J. Turbul. 2008. V. 9. P. 1.
36. *Picano F., Sardina G., Casciola C.M.* Spatial Development of Particle-laden Turbulent Pipe Flow // Phys. Fluids. 2009. V. 21. P. 093305.
37. *Elghobashi S., Truesdell G.C.* Direct Simulation of Particle Dispersion in a Decaying Isotropic Turbulence // J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 655.

38. *Boivin M., Simonin O., Squires K.D.* Direct Numerical Simulation of Turbulence Modulation by Particles in Homogeneous Turbulence // *J. Fluid Mech.* 1998. V. 375. P. 235.
39. *Pan Y., Banerjee S.* Numerical Simulation of Particle Interactions with Wall Turbulence // *Phys. Fluids.* 1996. V. 8. P. 2733.
40. *Zhao L.H., Andersson H.I., Gillissen J.J.J.* Turbulence Modulation and Drag Reduction by Spherical Particles // *Phys. Fluids.* 2010. V. 22. P. 081702.
41. *Zhao L.H., Andersson H.I., Gillissen J.J.J.* Interphasial Energy Transfer and Particle Dissipation in Particle-laden Wall Turbulence // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 715. P. 32.
42. *Lee J., Lee C.* Modification of Particle-laden Near-wall Turbulence: Effect of Stokes Number // *Phys. Fluids.* 2015. V. 27. P. 023303.
43. *Letournel R., Laurent F., Massot M., Vie A.* Modulation of Homogeneous and Isotropic Turbulence by sub-Kolmogorov Particles: Impact of Particle Field Heterogeneity // *Int. J. Multiph. Flow.* 2020. V. 125. P. 103233.
44. *Yu Z., Xia Y., Lin J.* Modulation of Turbulence Intensity by Heavy Finite-Size Particles in Upward Channel Flow // *J. Fluid Mech.* 2021. V. 913. A3.
45. *Smagorinsky J.* General Circulation Experiments with the Primitive Equations // *Mon. Weather Rev.* 1963. V. 91. P. 99.
46. *Bardina J., Ferziger J.H., Reynolds W.C.* Improved Turbulence Models Based on LES of Homogeneous Incompressible Turbulent Flows. Tech. Rep. No. TF-19. Stanford, Depart. Mech. Eng.: Stanford, CA, USA, 1984.
47. *Clark R.A., Ferziger J.H., Reynolds W.C.* Evaluation of Subgrid-scale Models Using an Accurately Simulated Turbulent Flow // *J. Fluid Mech.* 1979. V. 91. P. 1.
48. *Stolz S., Adams N.A., Kleiser L.* An Approximate Deconvolution Model for Large-Eddy Simulation with Application to Incompressible Wall-bounded Flows // *Phys. Fluids.* 2001. V. 13. P. 997.
49. *Deardorff J.W., Peskin R.L.* Lagrangian Statistics from Numerically Integrated Turbulent Shear Flow // *Phys. Fluids.* 1970. V. 13. P. 584.
50. *Uijtewaal W.S.J., Oliemans R.V.A.* Particle Dispersion and Deposition in Direct Numerical and Large Eddy Simulation of Vertical Pipe Flows // *Phys. Fluids.* 1996. V. 8. P. 2590.
51. *Wang Q., Squires K.D.* Large Eddy Simulation of Particle Deposition in a Vertical Turbulent Channel Flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 1996. V. 22. P. 667.
52. *Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W.H.* A Dynamic Subgrid-scale Eddy Viscosity Model // *Phys. Fluids.* 1991. A3. P. 1760.
53. *Boivin M., Simonin O., Squires K.D.* On the Prediction of Gas-solid Flows with Two-way Coupling Using Large Eddy Simulation // *Phys. Fluids.* 2000. V. 12. P. 2080.
54. *Yamamoto Y., Potthoff M., Tanaka T., Kajishima T., Tsuji Y.* Large-eddy Simulation of Turbulent Gas-particle Flow in a Vertical Channel: Effect of Considering Inter-particle Collisions // *J. Fluid Mech.* 2001. V. 442. P. 303.
55. *Vreman A.W., Geurts B.J., Deen N.G., Kuipers J.A.M., Kuerten J.G.M.* Two- and Four-way Coupled Euler-Lagrangian Large-eddy Simulation of Turbulent Particle-laden Channel Flow // *Flow Turbul. Combust.* 2009. V. 82. P. 47.
56. *Mallouppas G., van Wachem B.* Large Eddy Simulations of Turbulent Particle-laden Channel Flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 2013. V. 54. P. 65.
57. *Breuer M., Alletto M.* Efficient Simulation of Particle-laden Turbulent Flows with High Mass Loadings Using LES // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2012. V. 35. P. 2.
58. *Pozorski J., Apte S.V.* Filtered Particle Tracking in Isotropic Turbulence and Stochastic Modeling of Subgrid-scale Dispersion // *Int. J. Multiph. Flow.* 2009. V. 35. P. 118.
59. *Alletto M., Breuer M.* Prediction of Turbulent Particle-laden Flow in Horizontal Smooth and Rough Pipes Inducing Secondary Flow // *Int. J. Multiph. Flow.* 2013. V. 55. P. 80.
60. *Breuer M., Almohammed N.* Modeling and Simulation of Particle Agglomeration in Turbulent Flows Using a Hard-sphere Model with Deterministic Collision Detection and Enhanced Structure Models // *Int. J. Multiph. Flow.* 2015. V. 73. P. 171.
61. *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Y.* The Adaptive Composite Block-structured Grid Calculation of the Gas-dynamic Characteristics of an Aircraft Moving in a Gas Environment // *Mathematics.* 2022. V. 10. P. 2130.
62. *Martynenko S.I., Varaksin A.Y.* Black-box Solver for Numerical Simulations and Mathematical Modelling in Engineering Physics // *Mathematics.* 2023. V. 11. P. 3442.
63. *Губертюв А.М., Миронов В.В., Волкова Л.И. и др.* Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. Коротеяева А.С. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
64. *Миронов В.В., Толкач М.А.* Термическая деструкция резиноподобных теплозащитных материалов под слоем конденсированной фазы // *ТВТ.* 2019. Т. 57. № 2. С. 269.
65. *Миронов В.В., Толкач М.А.* Состав и свойства газобразных продуктов деструкции резиноподобной теплозащиты // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 5. С. 747.
66. *Миронов В.В., Толкач М.А., Тлевцежев В.В.* Экспериментальное исследование прочности резиноподобной коксующейся теплозащиты // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 4. С. 575.
67. *Миронов В.В., Толкач М.А., Тлевцежев В.В.* Тепловые эффекты и влияние гомогенных реакций в пограничном слое на гетерогенные реакции с углеродом прококсованного слоя теплозащитного покрытия // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 6. С. 880.
68. *Горский В.В.* Расчетно-теоретическая модель уноса массы углеродных теплозащитных материалов в окислительных газовых потоках // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 2. С. 249.
69. *Davuluri R.S.C., Zhang H., Tagavi K.A., Martin A.* Effect of Spalled Particles Thermal Degradation on a Hypersonic Flow Field Environment // *Int. J. Multiph. Flow.* 2023. V. 159. P. 104287.
70. *Астапов А.Н., Жаворонок С.И., Курбатов А.С., Рабинский Л.Н., Тушавина О.В.* Основные проблемы при создании систем тепловой защиты на базе структурно-неоднородных материалов и методы их решения // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 2. С. 248.
71. *Дегтярь В.Г., Сон Э.Е.* Гиперзвуковые летательные аппараты. М.: Янус-К, 2018.
72. *Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховолов В.К., Граменицкий М.Д., Дулепов Н.П., Скибин В.А., Суриков Е.В., Хилькевич В.Я., Яновский Л.С.* Интегральные прямоточные воздушно-реактивные

- двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / Под ред. Яновского Л.С. М.: Академкнига, 2006.
73. *Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Прохоров А.Н., Яновский Л.С.* Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнтальпийном воздушном потоке // *ФГВ*. 2017. Т. 53. № 3. С. 42.
  74. *Арефьев К.Ю., Абрамов М.А., Воронецкий А.В., Сон Э.Е.* Оптимизация инжекции двухфазных продуктов газификации энергетических конденсированных составов в модельную камеру сгорания малого удлинения // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 1. С. 94.
  75. *Reviznikov D.L., Sposobin A.V., Ivanov I.E.* Oscillatory Flow Regimes Resulting from the Shock Layer-particle Interaction // *High Temp*. 2020. V. 58. № 2. P. 280.
  76. *Ревизников Д.Л., Способин А.В., Иванов И.Э.* Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных об осциллирующем течении, индуцированном газодинамическим взаимодействием частицы с ударным слоем // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 6. С. 901.
  77. *Рудинский А.В., Ягодников Д.А.* Электрофизика горения углеводородного горючего в камере жидкостного ракетного двигателя // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 3. С. 422.
  78. *Рудинский А.В., Ягодников Д.А., Гришин С.А., Горбунов А.Е., Бурков А.С., Бобров А.Н., Сафонова Д.Б.* Акустическая и электрофизическая диагностика двухфазного высокоэнтальпийного потока. Результаты экспериментальных исследований // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 5. С. 737.
  79. *Ягодников Д.А.* Методика регистрации и анализ амплитудного спектра колебаний напряженности магнитного и электрического поля продуктов сгорания модельного жидкостного ракетного двигателя в зависимости от давления в камере сгорания // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 1. С. 87.
  80. *Ягодников Д.А., Ворожеева О.А., Новиков А.О.* Экспериментальное исследование процессов сажеобразования при горении переобогащенной кислородметановой смеси // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 5. С. 774.
  81. *Гольдштейн К.Д., Логунов М.А., Потанов Д.О., Орехов Н.Д.* О влиянии морфологии поверхности сажевых частиц на кинетику их роста. Молекулярно-динамическое исследование // *ТВТ*. 2023. Т. 61. № 1. С. 68.
  82. *Азатын В.В., Прокопенко В.М., Сон Э.Е., Абрамов С.К.* Зависимости характеристик распространения пламени от гетерогенных реакций промежуточных частиц // *ТВТ*. 2023. Т. 61. № 1. С. 91.
  83. *Вараксин А.Ю.* Воздушные и огненные концентрированные вихри: физическое моделирование (обзор) // *ТВТ*. 2016. Т. 54. № 3. С. 430.
  84. *Вараксин А.Ю.* Воздушные торнадоподобные вихри: математическое моделирование // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 2. С. 291.
  85. *Varaksin A.Y., Ryzhkov S.V.* Mathematical Modeling of Structure and Dynamics of Concentrated Tornado-like Vortices: A Review // *Mathematics*. 2023. V. 11. P. 3293.
  86. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.* О возможностях визуализации при моделировании воздушных смерчей // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 4. С. 617.
  87. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* Tornado-Like Gas-Solid Flow // *The 6th Int. Symp. on Multi-phase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion*. AIP Conf. Proc. 2010. V. 1207. P. 342.
  88. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.* К вопросу управления поведением воздушных смерчей // *ТВТ*. 2009. Т. 47. № 6. С. 870.
  89. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.* О возможности воздействия на вихревые атмосферные образования // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 3. С. 433.
  90. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А.* Моделирование свободных тепловых вихрей: генерация, устойчивость, управление // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 6. С. 965.
  91. *Вараксин А.Ю., Желебовский А.А., Мочалов А.А.* Измерения полей концентрации частиц при обтекании затупленного тела двухфазным потоком // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 3. С. 415.
  92. *Вараксин А.Ю., Мочалов А.А., Желебовский А.А.* Характеристики течения в следе за крупной движущейся частицей // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 5. С. 701.
  93. *Liu Y., Liu J., Li G., Zhou L.* Four-Way Coupled Modelling of Swirling Particle-laden Flow in Methane-central Coaxial Jets // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2023. V. 214. P. 124342.
  94. *Белов Н.К., Завершинский И.П., Климов А.И., Курушина С.Е., Молевич Н.Е., Порфирьев Д.П.* Исследование свойств закрученного потока водяных паров с частицами алюминия и источником нагрева // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 2. С. 225.
  95. *Дьячков Л.Г., Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Павлов С.И., Карасев В.Ю.* Исследование вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде в сильных магнитных полях с учетом влияния ионного увлечения // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 6. С. 938.
  96. *Еремин А.В.* Различные механизмы инициирования детонации – “вечнозеленая тема” академика Фортова // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 6. С. 903.
  97. *Гуренцов Е.В., Кулешов П.С., Михеева Е.Ю.* К вопросу об аномальном поведении оптической плотности железных наночастиц при их нагреве ударной волной // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 2. С. 213.
  98. *Гуренцов Е.В., Дракон А.В., Еремин А.В., Колотушкин Р.Н., Михеева Е.Ю.* Влияние размеров и структуры сажевых частиц, синтезированных при пиролизе и горении углеводородов, на их оптические свойства // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 3. С. 374.
  99. *Гуренцов Е.В., Дракон А.В., Еремин А.В., Михеева Е.Ю.* К вопросу о влиянии малой примеси ацетона на процесс термического саморазложения ацетилена // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 6. С. 897.
  100. *Малай Н.В., Шукин Е.Р., Шостак Ю.И.* О влиянии теплообмена на фотофорез нагретой крупной аэрозольной частицы // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 6. С. 866.
  101. *Бульчев Н.А., Иони Ю.В., Димитриева С.Е., Чеботарев С.Н., Рабинский Л.Н.* Плазмохимический синтез наноразмерных бактерицидных частиц под действием ультразвуковой кавитации // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 5. С. 770.
  102. *Бульчев Н.А.* Получение наноразмерных материалов в плазменных разрядах и ультразвуковой кавитации // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 4. С. 600.
  103. *Деревич И.В., Клочков А.К.* Тепловой взрыв одиночных частиц в случайном поле температуры среды // *ТВТ*. 2023. Т. 61. № 1. С. 108.

104. *Вараксин А.Ю.* Обтекание тел дисперсными газовыми потоками // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 282.
105. *Сао Y., Тан W., Wu Z.* Aircraft Icing: An Ongoing Threat to Aviation Safety // *Airspace Sci. Technol.* 2018. V. 75. P. 353.
106. *Yamazaki M., Jemcov A., Sakaue H.* A Review on the Current Status of Icing Physics and Mitigation in Aviation // *Aerospace.* 2021. Т. 8. P. 188.
107. *Olsen W., Walker E.* Experimental Evidence for Modifying the Current Physical Model for Ice Accretion on Aircraft Surface // 3rd Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Vancouver, Canada. May 6–8, 1986. NASA Tech. Memor. 87184. 46 p.
108. *Гринац Э.С., Жбанов В.А., Кашеваров А.В., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л.* Динамика капли на поверхности тела в потоке газа // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 246.
109. *Жбанов В.А., Стасенко А.Л., Токарев О.Д.* Исследование теплообмена капли, ускоряемой потоком воздуха вдоль поверхности твердого тела, при обледенении летательного аппарата // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 860.
110. *Вараксин А.Ю., Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Ходаков К.А.* О некоторых особенностях гравитационного осаждения капель на модель с полусферическим горцем // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 715.
111. *Вараксин А.Ю., Васильев Н.В., Вавилов С.Н.* О механизме левитации капель при обтекании тел газочапельными потоками // Докл. РАН. Физика, техн. науки. 2021. Т. 501. С. 38.
112. *Debnath D., Verma D., Kumar P., Balakrishnan V.* Understanding the Impact Dynamics of Droplets on Superhydrophobic Surface // *Int. J. Multiphase Flow.* 2023. V. 159. P. 104344.
113. *Qian L., Huo B., Chen Z., Li E., Ding H.* Droplet Bouncing on Moving Superhydrophobic Groove Surfaces // *Int. J. Multiphase Flow.* 2023. V. 165. P. 104454.
114. *Laroche H.P., Radenac E., Laurendeau E.* Stochastic Ice Accretion Model Using an Unstructured Advancing Front Technique // *Int. J. Multiphase Flow.* 2023. V. 163. P. 104420.
115. *Lee E.D., Maynes D., Crockett J., Iverson B.D.* Thermal Atomization on Superhydrophobic Surfaces of Varying Temperature Jump Length // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2023. V. 216. P. 124587.
116. *Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.Д.* Газотермическое напыление композиционных порошков. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
117. *Богомолова О.Ю., Данилаев М.П.* Параметры течения многофазных газовых потоков в задаче капсулирования субмикронных частиц полимером // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2016. № 3. С. 25.
118. *Тукмаков А.Л.* Модель динамики дисперсных фракций во встречных потоках металлопорошка и полимера при образовании композитного материала // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 415.
119. *Аминов Р.З., Счастливец А.И., Байрамов А.Н.* Экспериментальная оценка состава генерируемого пара при сжигании водорода в кислороде // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 437.
120. *Аминов Р.З., Егоров А.Н., Рыжков А.А.* Исследование горения топливной смеси  $H_2-O_2-H_2O$  в камере сгорания водородного парогенератора // ТВТ. 2022. Т. 60. № 4. С. 557.
121. *Счастливец А.И., Дуников Д.О., Борзенко В.И., Шматов Д.П.* Водородно-кислородные установки для энергетики // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 809.
122. *Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Surtaev A.S., Tsoi A.N., Mazheiko N.A., Busov K.A., Skokov V.N.* Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets // *J. Eng. Thermophys.* 2013. V. 22. № 3. P. 174.
123. *Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Busov K.A.* Recoil Force and Spray Angle of a Plane Jet of Superheated Water // *Interfac. Phenom. Heat Transfer.* 2017. V. 5. № 3. P. 201.
124. *Бусов К.А., Мажейко Н.А.* Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 316.
125. *Комов А.Т., Захаренков А.В., Толмачев В.В., Штелинг В.С.* Процессы в факеле распыла теплоносителя // ТВТ. 2023. Т. 61. № 3. С. 410.
126. *Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Nissar Z., Sazhin S.S.* Puffing/Micro-explosion in Composite Fuel/Water Droplets Heated in Flames // *Combust. Flame.* 2021. V. 233. P. 111599.
127. *Islamova A.G., Kerimbekova S.A., Shlegel N.E., Strizhak P.A.* Droplet-droplet, Droplet-particle, and Droplet-substrate Collision Behavior // *Powder Technology.* 2022. V. 403. P. 117371.
128. *Kropotova S., Strizhak P.* Collisions of Liquid Droplets in a Gaseous Medium Under Conditions of Intense Phase Transformations: Review // *Energies.* 2021. V. 14. P. 6150.
129. *Формалев В.Ф., Дегтяренко Р.А., Гарибян Б.А., Колесник С.А.* Моделирование тепломассопереноса при периодическом напылении высокотемпературного теплозащитного покрытия // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 566.
130. *Кутамеладзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И.* Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1987. 282 с.
131. *Гунта А., Лилли Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
132. *Халатов А.А.* Теория и практика закрученных потоков. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.
133. *Пахомов М.А., Терехов В.И.* Распределение концентрации частиц в газочапельном ограниченном закрученном потоке. Эйлеров и лагранжевы подходы // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 896.
134. *Аманбаев Т.Р.* Течение двухфазной парочапельной смеси в канале переменного сечения при наличии фазовых превращений // ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 275.
135. *Hughes M.T., Boziuk T.R., Glezer A., Garimella S.* Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of Acoustically Actuated Horizontal Two-phase Flow // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2023. V. 216. P. 124574.
136. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
137. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Динамика частиц при воздействии вибрации. Киев: Наукова думка, 1975. 168 с.
138. *Ганиев Р.Ф., Кобаско Н.И., Кулик В.В. и др.* Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. Киев: Техника, 1980. 143 с.

139. *Ilgatov M.A., Zaripov R.G., Galiullin R.G., Repin V.B.* Nonlinear Oscillations of a Gas in a Tube // *Appl. Mech. Rev.* 1996. V. 49. № 3. P. 137.
140. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Р.* Влияние фазовых переходов на распространение акустических волн в многофракционных газозвесах с полидисперсными включениями // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 1. С. 133.
141. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 1. С. 146.
142. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.* Резонансные колебания газа и аэрозоля в открытой трубе со скачком сечения // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 1. С. 145.
143. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Р.* Цилиндрические и сферические волны в многофракционных парогазокапельных смесях с полидисперсными включениями // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 4. С. 543.
144. *Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р.* Волновая динамика газозвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 3. С. 443.
145. *Тукмаков А.Л., Ахунов А.А.* Эволюция состава и изменение характера колебаний коагулирующей газозвеси в волновом поле акустического резонатора // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 6. С. 873.
146. *Бородина Т.И., Глазков В.В., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Синкевич О.А., Тепляков И.О., Юдин С.М.* Интенсивная эмиссия капель при плавлении металлических образцов в высокочастотном индукторе // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 2. С. 258.
147. *Кузмишев А.Г., Шебзухова М.А., Бжихатлов К.Ч., Шебзухов А.А.* Размерные зависимости тепловых свойств наночастиц. Поверхностное натяжение // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 3. С. 343.
148. *Суртаев А.С., Назаров А.Д., Миськив Н.Б., Сердюков В.С.* Применение высокоскоростной видеосъемки и ИК-термографии для исследования характеристик двухфазного потока и теплообмена при аэрозольном охлаждении нагретой поверхности // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 1. С. 142.
149. *Duke-Walker V., Musick B.J., McFarland J.A.* Experiments on the Breakup and Evaporation of Small Droplets at High Weber Number // *Int. J. Multiphase Flow.* 2023. V. 161. P. 104389.
150. *Worner M.* Maximum Spreading of an Impacting Drop // *Int. J. Multiphase Flow.* 2023. V. 167. P. 104528.
151. *Cai C., Liu H., Chen H., Si C.* Alcohol-induced Elevation in the Dynamic Leidenfrost Point Temperature for Water Droplet Impact // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2023. V. 215. P. 124483.
152. *Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.* Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 2. С. 280.
153. *Mudawar I., Bowers H.B.* Parametric Study of Ultra-high CHF in Highly Subcooled Water Inside Small Diameter Tubes // *Convective Flow Boiling* / Ed. Chen J.C. Taylor & Francis, 1995. P. 117.
154. *Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Федулеников В.М.* О природе “газового” кризиса кипения // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 6. С. 881.
155. *Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Эпельфельд А.В.* Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // *ТВТ.* 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
156. *Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Вавилов С.Н.* Паровые агломераты и сухие пятна как предвестники кризиса кипения недогретой жидкости в канале // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 3. С. 373.
157. *Сычев А.И.* Воспламенение систем жидкость–пузырьки газа ударной волной // *ФГВ.* 1985. Т. 21. № 2. С. 130.
158. *Сычев А.И.* Волна детонации в системе жидкость–пузырьки газа // *ФГВ.* 1985. Т. 21. № 3. С. 103.
159. *Кузнецов Н.М., Копотев В.А.* Структура волны и условие Чепмена–Жуге при гетерогенной детонации в жидкостях с пузырьками газа // *Докл. АН СССР.* 1989. Т. 304. № 4. С. 850.
160. *Ждан С.А.* О стационарной детонации в пузырьковой среде // *ФГВ.* 2002. Т. 38. № 3. С. 85.
161. *Гималтдинов И.К., Лепихин С.А.* Исследование постдетонационных волн после встречного столкновения детонационных волн в пузырьковой жидкости // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 2. С. 236.
162. *Гималтдинов И.К., Родионов А.С., Кочанова Е.Ю.* Динамика детонационных волн при наклонном падении на границу пузырьковой жидкости // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 3. С. 421.
163. *Гималтдинов И.К., Лепихин С.А.* Об инициировании пузырьковой детонации волнами малой амплитуды // *ТВТ.* 2022. Т. 60. № 5. С. 715.
164. *Губайдуллин Д.А., Гафиятов Р.Н.* Отражение и прохождение акустической волны через многофракционный пузырьковый слой // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 1. С. 97.
165. *Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.* Акустические волны в жидкости с газовыми включениями, имеющими жидкую прослойку и вязкоупругую оболочку // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 4. С. 533.
166. *Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.* Волновая динамика капель перфторуглерода в вязкоупругой жидкости // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 3. С. 436.
167. *Аганин А.А., Хисматуллина Н.А., Нигматуллин Р.И.* Импульсное воздействие на коллапс кавитационного пузырька // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 3. С. 419.
168. *Аганин А.А., Аганин И.А., Давлетишин А.И., Нигматуллин Р.И.* Отклик газовых пузырьков в сферических кластерах на однократный импульс разрежения // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 1. С. 98.
169. *Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф.* Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 4. С. 634.
170. *Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю.* Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза // *ТВТ.* 2021. Т. 59. № 6. С. 869.