

109. Кузнецов В. М. О форме воронки выброса при взрыве на поверхности грунта // ПМТФ.— 1960.— № 3.
110. Поляк Э. Б., Шер Е. Н. Об одном варианте твердожидкостной модели взрыва в грунте // ПМТФ.— 1977.— № 5.
111. Шер Е. Н., Перминова Т. Т. Определение формы воронки при взрыве заглубленного пинурового заряда в грунте // Проблемы математики и механики.— Новосибирск: Наука, 1983.
112. Власов О. Е., Смирнов С. А. Основы расчета дробления горных пород действием взрыва.— М.: Изд-во АН СССР, 1962.
113. Шер Е. Н., Черников А. Г. О сдвиговом способе равномерного дробления горной породы при взрыве // ФТПРПИ.— 1980.— № 6.
114. Забабахин Е. И. Ударные волны в слоистых системах // ЖЭТФ.— 1965.— Т. 49, № 2.
115. Козырев А. С., Костылева В. Е., Рязанов В. Т. Кумуляция ударных волн в слоистых средах // ЖЭТФ.— 1969.— Т. 56, № 2.
116. Лаптев В. И., Тришин Ю. А. Увеличение начальной скорости и давления при ударе по неоднородной преграде // ПМТФ.— 1974.— № 6.
117. Крошко Е. А., Чубарова Э. В. Численное моделирование высокоскоростного удара по многослойным пластинам // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности.— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1980.— Ч. 1.
118. Санюжников Г. А., Фомин В. М. К численному моделированию явления неограниченной кумуляции в слоистых средах // Там же.
119. Нестеренко В. Ф. Ударное сжатие многокомпонентных материалов // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1977.— Вып. 29.
120. Тришин Ю. А., Фоминых А. Г. Явление кумуляции в слоистых системах // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1981.— Вып. 53.
121. Войтенко А. Е., Любимова М. А., Соболев О. П., Сынах В. С. Градиентные ускорения ударной волны и возможные применения этого эффекта // Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1970.— № 14—70.
122. Терновой В. Я. Получение высоких скоростей метания при использовании взрывных линейных устройств // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1980.— Вып. 48.
123. Тришин Ю. А., Фоминых А. Г. О метании слоистых тел с помощью кумулятивной струи // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1983.— Вып. 62.
124. Качан М. С., Киселев Ю. В., Тришин Ю. А. Взаимодействие ударных волн с контактной границей соударяющихся тел // ФГВ.— 1975.— № 5.
125. Качан М. С., Тришин Ю. А. Волны сжатия и растяжения при соударении твердых тел // ФГВ.— 1975.— № 6.
126. Качан М. С., Тришин Ю. А. Роль опоры в формировании соединения при сварке взрывом // Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами сваркой, плакированием, упрочнением и пресованием металлических порошков взрывом.— Готвальдов (ЧССР), 1979.
127. Качан М. С., Тришин Ю. А. Влияние прокладки между ВВ и метаемой деталью на качество соединения при сварке взрывом // Там же.
128. Качан М. С., Тришин Ю. А. Растягивающие напряжения в мишени при соударении твердых тел // ПМТФ.— 1977.— № 4.

Поступила 26/XII 1986 г.

УДК 536.24

ТЕПЛОФИЗИКА. ПУТИ РАЗВИТИЯ И ПРОБЛЕМЫ

В. Е. Накоряков, Н. А. Рубцов

(Новосибирск)

Теплофизика — раздел физики, занимающийся изучением макропереносов энергии и вещества термодинамических систем, сопровождающихся эффектами диссипации энергии и соответствующего увеличения энтропии. Феноменологические концепции теплофизики вытекают из термостатики и термодинамики необратимых процессов. Практическая реализация проблем теплофизики осуществляется с широким привлечением микрофизических представлений, вытекающих из электродинамики, молекулярной физики, гидрогазодинамики и других разделов физики.

Современная теплофизика сложилась как научное направление в 50—60-е годы и сейчас представлена рядом академических институтов и отраслевых лабораторий. Изучаемые ею явления связаны со сложными взаимодействиями термодинамических, гидрогазодинамических и электродинамических процессов в твердых телах, жидкостях, газах, плазме. Во многих случаях указанные процессы осложнены физико-химическими превращениями, существенной неравновесностью и переменностью физических свойств веществ [1].

В настоящей работе на базе основных результатов, полученных в Институте теплофизики СО АН СССР за более чем двадцатилетний период его существования, освещены пути развития и проблемы теплофизики.

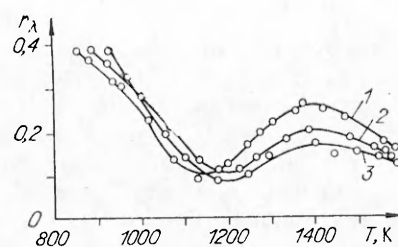
По своей организационной структуре теплофизика объединяет в себе два взаимосвязанных раздела, включающих исследования в области необратимых процессов переноса энергии и вещества, а также термодинамические (калорические) и транспортные свойства веществ. Исследования в области термодинамических и транспортных свойств веществ (теплофизических свойств веществ) носят практическую направленность и связаны, в первую очередь, с получением надежной информации о свойствах новых теплоносителей, рабочих тел и конструкционных материалов.

В результате экспериментального изучения теплопроводности и температуропроводности многих тугоплавких металлов в области температур вплоть до температур плавления, термодинамических и теплофизических характеристик группы щелочных металлов, фреонов метанового ряда и диссоциирующей четырехокси азота получены новые данные, вошедшие в фундаментальные справочные издания и аттестованные таблицы ГСССД СССР *.

На основе экспериментов с технически важными концентрированными водно-солевыми растворами, легкоплавкими сплавами, чугуном и сталями [2—4] составлены таблицы свойств, термодинамические и фазовые диаграммы, которые широко используются в проектных и научных организациях. Исследования охватывают широкий диапазон параметров состояния и спектр свойств, а потому имеют помимо практического и научное значение для физики газов и конденсированного состояния, термодинамики растворов. На основе полученных экспериментальных данных были разработаны приближенная теория молекулярных масштабов для жидких металлов, методика расчета констант скоростей обратимых химических реакций (термической диффузии) по данным о неравновесной скорости звука [3], установлены структурные закономерности изменения свойств и получены полуэмпирические соотношения для прогнозирования термических свойств редкоземельных элементов [4], расчета физических характеристик магнитных жидкостей и теплопроводности прессованных порошковых металлических материалов (тепломеханическое подобие гетерогенных структур). К числу важных научных результатов следует отнести создание оригинальных методов экспериментального изучения свойств и материалов: модуляционный метод измерения температуропроводности материалов с электронным нагревом температур до 2500—3000 К, вибрационные методы измерения вязкости и фазового анализа, битермический метод измерения равновесия раствор — пар, метод измерения поверхностного натяжения жидких металлов при высоких температурах, проточный микрокалориметр для измерения теплоемкости газов.

Изучение оптических свойств и свойств теплового излучения веществ сопряжено с использованием основных положений электромагнитной и квантовой теории, определяющих процессы взаимодействия излучения с веществом. Широкое разнообразие практически используемых материалов и условий (температура и окружающая среда), в которых они работают, выдвигает на первый план эксперименты. В них измерены интегральные и спектральные характеристики излучения (степени черноты, поглощательные и отражательные способности как направленные, так и полусферические) в широком диапазоне температур (от температур жидкого гелия до 3000 К и выше) широкого класса конструкционных и теплозащитных материалов. Особый интерес представляют экспериментальные измерения, выполненные в условиях, максимально приближающихся к реальным (учет химических и энергетических взаимодействий материала с окружающей средой и связанных с ним структурных превращений). Типичным примером роли химических процессов в поверхностных слоях материала и связанных с ними структурных превращений является кинетика значений спектральной отражательной способности поликристал-

* Теплофизические свойства щелочных металлов. — М.: Изд-во стандартов, 1970; Теплопроводность жидкостей и газов. — М.: Изд-во стандартов, 1978; Теплофизические свойства фреонов. — М., 1982. — Ч. I—II и др.



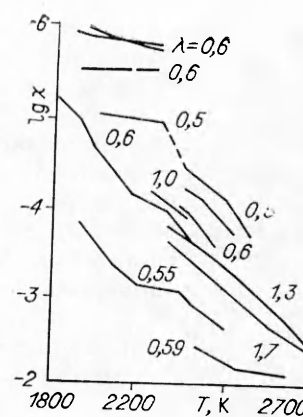
Р и с. 1

лического графита В1 с ростом температуры (рис. 1, $\lambda = 1,725$ [5], скорость подачи O_2 , м/с: $I = 0,6$; 2 — 1,25; 3 — 2,0). Практически важны измерения излучательных свойств материалов при низких температурах. Используемые

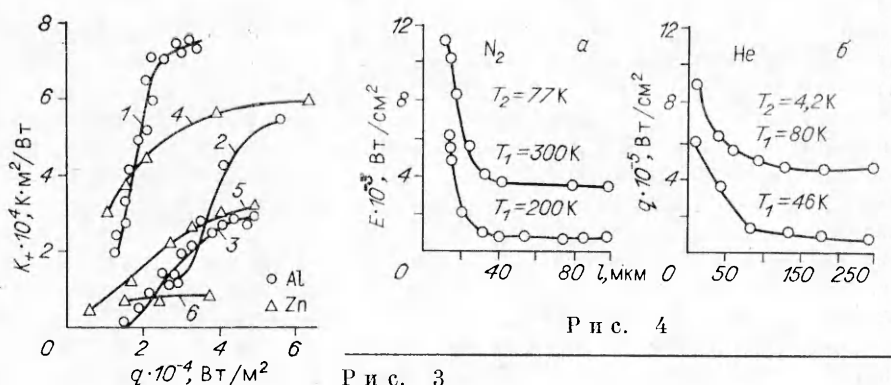
при этом calorиметрические методы измерения интегральных излучательных способностей позволяют избежать трудностей, вызванных измерениями малых потоков, излучаемых телами при криогенных температурах. Таким образом, по интегральному излучению была обнаружена точка фазового перехода сплава ниобия при $T = 9,1$ К. Самостоятельный интерес представляют экспериментальные исследования излучательных способностей дисперсных сред при высоких температурах. Действительно, расчетное определение излучательных свойств дисперсных сред, содержащих окислы металлов (Al_2O_3 , BeO), выполненное с привлечением спектральных значений оптических констант на основании данных о комплексном показателе преломления монокристаллов, не согласуется с экспериментальными, ибо в реальных условиях указанные вещества, прошедшие стадию плавления, имеют поликристаллическую структуру. В этой связи, если значения показателя поглощения χ монокристаллической окиси алюминия в области температур плавления ($T_{пл} = 2320$) изменяются скачком, полученные из опыта с частицами диаметром 50 ± 5 мкм и концентрацией $0,234 - 0,022$ г/см³ [6] рекристаллизованной окиси алюминия значения χ обладают монотонной зависимостью от температуры (рис. 2).

В последние годы заметно возрос интерес к исследованиям оптических и теплофизических свойств ультрамалых частиц. Экспериментально изучено возникновение и развитие коллективного эффекта в двумерной системе случайно расположенных малых металлических частиц, который выражается в нелинейном увеличении коэффициента поглощения излучения и смещении плазменного резонанса с ростом концентрации частиц. Установлено, что указанный эффект становится заметным при расстоянии между металлическими частицами меньше трех диаметров частиц; обнаружена зависимость коллективного эффекта от оптической проводимости вещества, не нашедшая пока своего отражения в существующих теоретических моделях.

Изучение процессов переноса энергии и вещества охватывает широкий круг проблем теплообмена в газообразных, жидких и многофазных средах. Простейшей формой переноса энергии в неподвижных средах является **теплопроводность**. Исследования в этой области в значительной мере сводились к рассмотрению краевых задач теплопроводности в телах произвольной конфигурации, в решении которых широко привлекается разнообразный арсенал методов математической физики. В этой связи наибольшее внимание уделялось рассмотрению нелинейных задач, постановка которых определялась необходимостью учета как зависимости теплофизических свойств материалов от температуры, так и нелинейности в граничных условиях (граничные условия типа Стефана — Больцмана) и в решении которых широко привлекались современные численные методы решения на ЭВМ.



Р и с. 2



Р и с. 4

Р и с. 3

Принципиальные вопросы взаимодействия тепловых потоков в условиях граничной неравновесности поставлены в [7], где на основании экспериментов показано существование аномальных температур (перегрева) поверхностных слоев чистых металлов. Параметр перегрева $K_+ = (\Delta T_s - \Delta T_p)/q$ (ΔT_s , ΔT_p — экспериментально и расчетно определенные перепады температур по толщине образца; q — плотность подводимого к образцу потока тепла (излучением)) определяется видом металла, качеством обработки поверхности, степенью черноты и совершенством его кристаллической структуры. На рис. 3 приведена зависимость перегрева алюминия и цинка от плотности потока, поглощаемого поверхностью. Здесь 1—3 — Al (99,995%), соответственно электрохимическая полировка, механическая и электрохимическая; образец предварительно подвергнут ковке; 4—6 — Sn, электрохимическая полировка; 4 — 99,998%, 5 — 99,998%, подвергнут ковке, 6 — 99,8%. Последующие экспериментальные исследования микроструктуры поверхностных слоев образцов выявили формирование дислокаций в слое с концентрациями, существенно превышающими их в основном массиве металла. Современная динамическая теория термомеханики исключает возможность размножения дислокаций в металлах при возмущениях, вызываемых тепловыми потоками рассмотренного выше порядка. Анализ теплового состояния и динамики перегрева оптически прозрачных (полупрозрачных) сред связан с привлечением теории теплообмена излучением.

Современная теория теплообмена излучением развилась на основе уравнения энергии излучения, описывающего перенос электромагнитных волн в лучевом приближении. Здесь сказалось существенное влияние методов теории астрофизики, а затем и физики переноса нейтронов. Теоретические подходы в описании переноса энергии излучения, используемые в теплофизике, ограничены диффузионным и квазидиффузионными методами, методами сферических гармоник (главным образом P_1 -приближения), а также интегральными и вытекающими из них алгебраическими (зональные методы) уравнениями излучения. Наиболее широко использовались и развивались интегральные уравнения излучения, зональные методы, а также метод средних потоков и его модификация [8]. Интегральные уравнения излучения для излучающих систем классической конфигурации позволяют решать широкий класс практических задач теплообмена излучением. Однако наибольшее число подобных работ связано с решением задач одномерного переноса энергии излучения в плоских слоях и неограниченных цилиндрах, заполненных поглощающей, излучающей и рассеивающей средой [8]. Одновременно с классическими решениями просматривались вопросы, связанные с пределами применимости уравнений переноса энергии излучения. В экспериментах [9] показано, что теплообмен между близко расположенными металлическими пластинами (рис. 4) в случае, если виновская длина волны излучения λ_v сопоставима с величиной зазора ($l \leq 3\lambda_v$, причем $lT = 3b$, где $b = 0,2898$ см·К — постоянная смещения Вина), не подчиняется классическим формулам

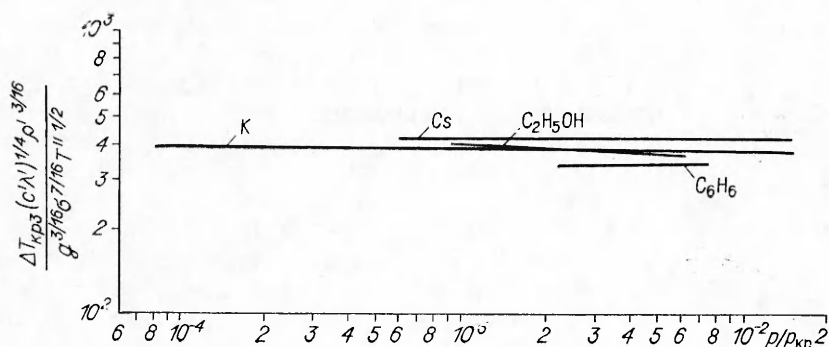
расчета и требует для своего описания привлечения теории флуктуационного электромагнитного поля. Подобные исследования стимулируют развитие теории многократного рассеяния волн применительно к теплообмену излучением в неоднородных средах. Практическое рассмотрение теплообмена излучением в реальных условиях сводится к изучению теплообмена в неподвижных (радиационно-кондуктивный теплообмен) теплопроводных полупрозрачных средах, которое осуществлялось как экспериментально, так и теоретически с привлечением численных методов решения нелинейных интегродифференциальных уравнений, учитывающих спектральный характер переноса излучения, зависимость теплофизических и оптических свойств материалов от температуры и т. п. Главное внимание уделяется изучению специфики взаимодействия излучения, теплопроводности, конвекции и его влияния на поле температур и потоков тепла [8].

Актуальными с точки зрения постановки разнообразных технологических задач являются сопряженные постановки задач радиационно-кондуктивного теплообмена в оптически неоднородных средах. На основании численного эксперимента обнаружен немонотонный характер нестационарного температурного поля в двухслойной системе, связанный с определяющей ролью излучения в характере прогрева оптически-неоднородных слоев. В случае жидких или газообразных веществ указанная немонотонность может привести к потере динамической устойчивости систем в целом. Особый интерес представляют задачи определения кинетики прогрева полупрозрачных материалов, обладающих объемным фазовым переходом. Постановка и рассмотрение таких задач приобретают практический интерес в связи с запросами технологии выращивания оптических кристаллов.

Обширный круг проблем связан с изучением процессов **теплообмена при свободной конвекции**. В области термогравитационной конвекции проводились исследования структур основного ламинарного, переходного и последующего турбулентного течений в плоских слоях жидкости с различной степенью ориентации их относительно вектора силы тяжести, а также в горизонтальных слоях жидкости со свободной поверхностью (термогравитационно-капиллярная конвекция). С ростом перепада температур между границами горизонтального слоя или его безразмерного аналога числа Рэлея ($Ra = \frac{\beta g}{\alpha \nu} \Delta T H^3$) происходит последовательное усложнение структуры течения. Показано, что тепловой поток — кусочно-линейная функция температурного перепада. В диапазоне $1,8 \cdot 10^3 \leq Ra \leq 6 \cdot 10^4$ измерены поля температур и скорости в формирующихся при этом ячейках жидкости и даны критериальные соотношения для определения теплопередачи [10].

Исследования теплообмена в вертикальных и наклонных слоях жидкости в зависимости от числа Прандтля Pr и угла наклона слоя показали существование пяти типов неустойчивости стационарного и колебательного характера. Переход к турбулентному режиму конвекции в вертикальном слое определяется $Ra_L = \beta g \Delta T L^3 / \alpha \nu \simeq 5 \cdot 10^{10}$ и характеризуется появлением в центральной части слоя продольного градиента температуры [11]. Структуры турбулентных пограничных слоев на вертикальной изотермической стенке в большом объеме жидкости и на вертикальных стенках, ограничивающих слой жидкости, оказываются одинаковыми, а локальное значение коэффициента теплоотдачи определяется на основании единого соотношения $Nu_x = 0,108 Ra_x^{1/3}$.

Ведутся эксперименты по конвективному теплообмену применительно к моделированию и физическому обоснованию одного из наиболее распространенных методов выращивания монокристаллов из расплавов (метод Чохральского). Для режимов свободной, смешанной и вынужденной конвекции построены карты областей существования течений различной пространственной формы.



Р и с. 5

Процессы теплообмена в жидкостях, претерпевающих такие фазовые превращения, как **кипение и конденсация**, чрезвычайно сложны. В настоящее время отсутствует строгое математическое описание этих процессов. В такой ситуации наиболее важны опыты и полуэмпирические модели, выделяющие главные параметры процесса и приводящие к относительно простым закономерностям.

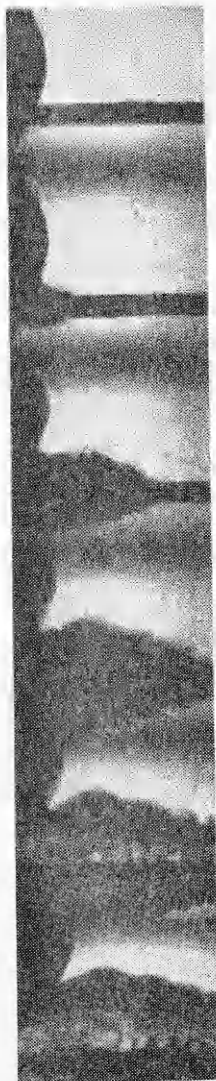
Проведен комплекс исследований механизма кипения, кризисов теплообмена для широкого класса теплоносителей (щелочные металлы, вода, органические и криогенные жидкости) [12—14]. Для описания механизма кипения металлов была разработана методика визуализации и скоростной киносъемки процесса кипения непрозрачных жидкостей. Основными элементами являются рентгеновский аппарат, электронно-оптический преобразователь, скоростная кинокамера. Использование этой методики позволило впервые получить данные по отрывным диаметрам пузырей, частотам их отрыва, скоростям роста пузырей при кипении щелочных металлов [15].

Обнаружен новый вид кризиса теплообмена, когда появление паровой пленки происходит после режима однофазной конвекции, минуя режим пузырькового кипения [12, 16]. Исследования показали существование пороговых значений перегревов жидкости, выше которых в метастабильном пристенном слое происходит лавинное образование паровых пузырьков с последующим испарением пристенного слоя жидкости и формированием паровой пленки.

На основании кавитационной модели [17] получена зависимость для этих пороговых значений перегрева жидкости $\Delta T^* = 3,8 \cdot 10^2 (T''')^{1/2} (c_p \lambda)^{-1/4} \sigma^{7/16} \rho^{-3/8} g^{3/16}$, которая обобщает данные для сред, различающихся по числам Прандтля на несколько порядков (рис. 5). В основу модели положена определяющая роль гидродинамических возмущений, излучаемых растущим пузырьком в метастабильный пристенный слой жидкости и снижающих потенциальный барьер, препятствующий росту паровых зародышей. Практическая важность полученной зависимости заключается также в том, что она позволяет определить нижнюю границу области для критических тепловых потоков при неустойчивом кипении металлов.

Экспериментами показано, что образование неустойчивых паровых пленок в переходном режиме кипения и при неустойчивом кипении обусловлено существованием пороговых значений перегрева пристенной жидкости (на рис. 6 приведена начальная стадия образования неустойчивой паровой пленки для этанола). Это позволило получить расчетные зависимости для перегревов теплоотдающей поверхности при первом и втором кризисах теплообмена, удовлетворительно описывающие данные для различных жидкостей.

В металлических жидкостях при критических режимах кипения имеет место существенный отвод тепла через жидкость. Учет этой составляющей теплового потока расширил область применения гидродинамической теор-



Р и с. 6

струй конденсата T_c в межтрубном пространстве h (R 12, $T'' = 60^\circ\text{C}$, $\Delta T = 35^\circ\text{C}$, 1 — $Re = 35$; 2 — 150; 3 — 250, $T'' = 70^\circ\text{C}$, $\Delta T = 50^\circ\text{C}$; 4 — 60; 5 — 250). На каждую нижерасположенную трубу пакета попадает жидкость при температуре, равной или почти равной температуре насыщения T'' . На поверхности этой трубы формируется начальный участок теплового пограничного слоя, где тепло от жидкости к стенке передается конвекцией. В общем виде теплообмен носит смешанный характер и среднее число Нуссельта по всему периметру трубы определяется зависимостью [20]

$$\langle Nu^* \rangle = (\langle Nu_n^* \rangle x_i + \langle Nu_k^* \rangle (\pi R - x_i)) / \pi R,$$

где $\langle Nu_n^* \rangle$ — среднее число Нуссельта на начальном участке теплового пограничного слоя; $\langle Nu_k^* \rangle$ — число Нуссельта при конденсации в области ламинарно-волнового течения пленки. Результаты опытов согласуются с аналитическим решением задачи о теплообмене при ламинарном течении пленки, где происходит формирование теплового пограничного слоя [21].

Выполнена большая серия экспериментов по теплообмену при конденсации движущегося пара на горизонтальном цилиндре при поперечном

рии кризисов на жидкие металлы [17]. Получена расчетная зависимость для критических тепловых потоков при кипении недогретых и насыщенных металлических и неметаллических жидкостей, которая с точностью $\pm 20\%$ описывает экспериментальные данные.

Для вычисления предельного (критического) теплового потока $q_{кр1}$ при кипении жидкостей С. С. Кутателадзе в конце 40-х годов предложил соотношение $K = [q_{кр1} / (r \sqrt{\rho''} \sqrt{g \sigma \Delta P})] = \text{const}$, вытекающее из утверждения, что в сугубо тепловом процессе решающая роль отводилась гидродинамике (здесь $K = 16$ для кипящих жидкостей). Действительно, в приведенном соотношении отсутствуют какие-либо тепловые параметры, и, следовательно, независимо от способа генерации пузырьков легкой фазы эта закономерность справедлива для всего класса двухфазных (двухкомпонентных) течений.

В качестве модели для экспериментальной проверки гипотезы об определяющей роли гидродинамики в разрушении пузырькового режима использовался барботаж жидкости газом, вдуваемым через микропористую пластину. Систематические опыты по изучению закономерностей прекращения пузырькового режима и теплообмена при барботаже жидкостей в разных условиях дали убедительное доказательство полной аналогии развития кризисной ситуации в пузырьковом режиме кипения и барботаже (рис. 7, 1 и 2). Исследования барботажа с позиций аналогии его с кипением подтвердили основные постулаты гипотезы о преобладающей роли гидродинамики в разрушении пузырькового режима кипения. Установлено, что этот процесс гидрогазодинамический, поскольку в нем кроме сил тяжести и динамического напора легкой фазы действуют силы вязкого трения в жидкости и сила акустического давления газообразной фазы [18].

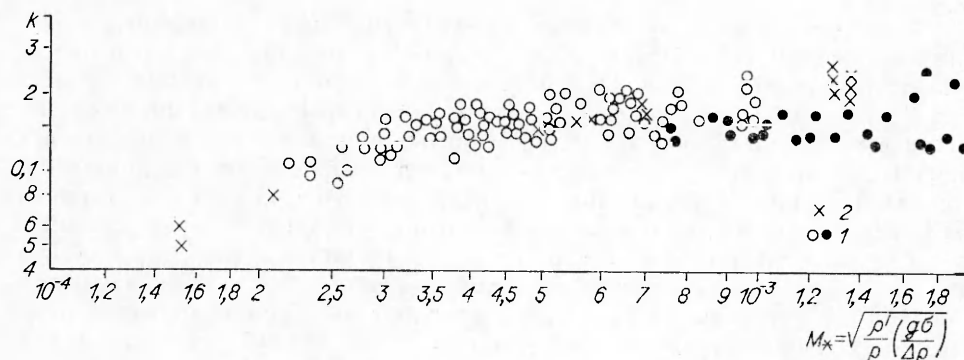
При изучении конденсации пара на пакетах труб принципиально важным является экспериментально установленное существование объемной конденсации пара на переохлажденных каплях и струях [19].

На рис. 8 представлена эпюра температур капель и струй конденсата T_c в межтрубном пространстве h (R 12, $T'' = 60^\circ\text{C}$, $\Delta T = 35^\circ\text{C}$, 1 — $Re = 35$; 2 — 150; 3 — 250, $T'' = 70^\circ\text{C}$, $\Delta T = 50^\circ\text{C}$; 4 — 60; 5 — 250). На каждую нижерасположенную трубу пакета попадает жидкость при температуре, равной или почти равной температуре насыщения T'' . На поверхности этой трубы формируется начальный участок теплового пограничного слоя, где тепло от жидкости к стенке передается конвекцией. В общем виде теплообмен носит смешанный характер и среднее число Нуссельта по всему периметру трубы определяется зависимостью [20]

$$\langle Nu^* \rangle = (\langle Nu_n^* \rangle x_i + \langle Nu_k^* \rangle (\pi R - x_i)) / \pi R,$$

где $\langle Nu_n^* \rangle$ — среднее число Нуссельта на начальном участке теплового пограничного слоя; $\langle Nu_k^* \rangle$ — число Нуссельта при конденсации в области ламинарно-волнового течения пленки. Результаты опытов согласуются с аналитическим решением задачи о теплообмене при ламинарном течении пленки, где происходит формирование теплового пограничного слоя [21].

Выполнена большая серия экспериментов по теплообмену при конденсации движущегося пара на горизонтальном цилиндре при поперечном



Р и с. 7

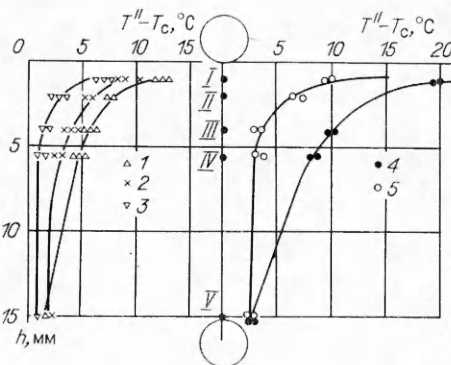
спутном обтекании. Результаты опытов доказали, что трение на границе раздела пар — пленка определяется величиной поперечного потока вещества.

За счет действия сил поверхностного натяжения возможна многократная интенсификация теплообмена при конденсации в расчете на полную поверхность оребренных труб. Обнаружено, что при оптимальных расстояниях между ребрами теплообмен при конденсации на пакетах оребренных труб очень слабо зависит от плотности орошения.

Значительный круг проблем **тепломассообмена при вынужденном движении среды** решался на основании формирования предельных, асимптотических ситуаций, при которых наиболее отчетливо выясняются главные черты исследуемого процесса. Идея такого подхода восходит к работе Кутателадзе С. С. [22], который, рассматривая турбулентное течение газа в трубе с шероховатыми стенками, на основании предположения о разрушении вязкого слоя микронеровностями поверхности получил относительный закон трения в виде $(c_{f1}/c_{f0})_{Re} = [2/(V\bar{\Psi} + 1)]^2$, где $\bar{\Psi} = T_{ст}/T_0$ — температурный фактор. В дальнейшем им было показано, что полученное соотношение выполняется и в случае течения газа в гладкой трубе при $Re \rightarrow \infty$. Идея формирования предельных относительных законов трения и теплообмена для турбулентного пограничного слоя с исчезающей вязкостью оказалась чрезвычайно плодотворной и завершилась разработкой асимптотической теории пристенной турбулентности [23—27]. Указанная теория позволяет проводить приближенные расчеты теплообмена и трения в потоках газов с учетом сжимаемости, неизоэнтальпичности и неоднородности, проницаемости обтекаемой поверхности, физико-химических превращений и т. п.

На основании исследований структур пристенного тепломассообмена и течения [28] разработана гипотеза о «размывании» теплового пограничного слоя с завесой на адиабатической стенке [23, 24], согласно которой асимптотическое значение отношения толщины потери энергии к толщине потери импульса стремится к конечной величине $(\delta_T^{**}/\delta^*) \rightarrow 9$.

Разработана общая теория газовых завес и пристенных струй и предложены модели расчета тепломассообмена и трения широкого класса течений с газовыми завесами (различные способы организации завес и условия течения на адиабатических, неадиабатических и химически реагирующих поверхностях).



Р и с. 8

Исследовано влияние внешней турбулентности на теплообмен и трение на проникаемой пластине [29], а также предыстории потока и интенсивности вдува на процессы турбулентного теплопереноса [30—32].

Пограничные слои с физико-химическими превращениями из-за наличия в уравнениях энергии и диффузии их описывающих источников членов, приводящих к неподобию соответствующих уравнений динамики, относятся к классу трудно поддающихся аналитическому рассмотрению. На основании гипотезы о тройной аналогии Рейнольдса, справедливой в случае рассмотрения задачи в диффузионном приближении при записи исходных уравнений в полных энтальпиях и обобщенных концентрациях с подобными граничными условиями, разработаны приближенные методы расчета. С использованием интегральных соотношений решен широкий класс течений с гетерогенным горением при наличии фронта пламени в пограничном слое [28, 33].

Радиационно-конвективный теплообмен охватывает широкий круг практических задач. Однако наибольшее внимание уделялось теплообмену излучением в ламинарных и турбулентных пограничных слоях на проникаемых поверхностях.

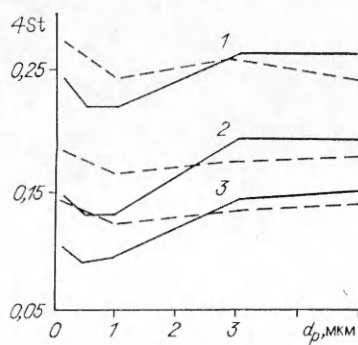
Численное решение задач радиационной газовой динамики подобного рода дает возможность путем варьирования параметром вдува через проникаемые поверхности в пограничные слои газовых сред, обладающих разнообразными свойствами поглощения и рассеяния излучения, рекомендовать наиболее эффективные способы тепловой защиты обтекаемых поверхностей.

В частности, при обтекании пластины потоком газа с $T = 1973$ К наиболее эффективным с точки зрения поддержания минимального значения суммарного теплового потока ($St = Q_w/[4Bo(\Theta_w - 1)]$) является вдув смеси воздух — частицы графита с оптимальным диапазоном размеров частиц 0,5—1 мкм (рис. 9) [34]. Здесь концентрации κ и α — размер частиц в сечении ламинарного погранслоя $x/L = 0,03$, $\kappa = 0,2; 0,4; 0,7$ — линии 1—3, штриховые линии — воздух — Al_2O_3 , сплошные — воздух — графит.

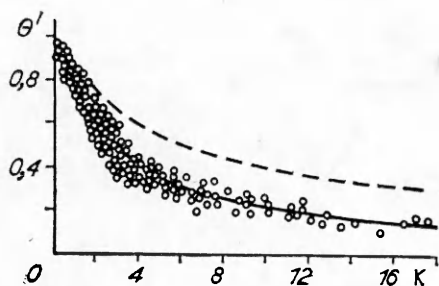
Современная высокотемпературная технология широко использует термическую плазму с $T > 3 \cdot 10^3$ К, генерируемую в электродуговых устройствах. Сложные взаимосвязанные электрофизические явления в разрядном канале и на электродах, влияние на протекающие при этом тепловые и электродинамические процессы геометрии каналов, материалов электродов, режимов течения газа и прочее не позволяют пока проводить корректные аналитические исследования. Здесь получили широкое применение методы теории подобия. Показано, что, несмотря на сложность процессов в разрядной камере плазмотрона, можно ограничиться относительно небольшим количеством критериев подобия [35].

В процессе детального изучения газодинамики и теплообмена в цилиндрическом канале с продольно обдуваемой электрической дугой установлены два режима горения, определяемые газодинамикой потока (стабилизированный и нестабилизированный). При нестабилизированном (турбулентном) режиме разряд неосесимметричен и имеет сложную ветвистую оптическую структуру. Токопроводящая зона за счет турбулентности в развитом течении локализуется в приосевой области [36].

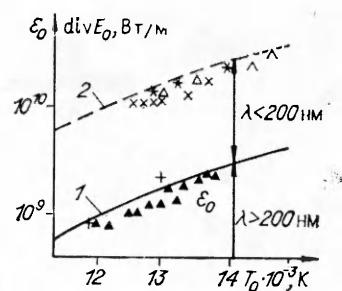
Тепловая эффективность электродугового плазмотрона повышается за счет применения газовых завес (дискретный вдув газа). Для разрядной цилиндрической камеры плазмотрона эффективность завесы определяется соотношением $\Theta' = \frac{q_k - q_{ks}}{q_k}$, где q_k ,



Р и с. 9



Р и с. 10



Р и с. 11

$q_{нс}$ — плотности конвективного потока тепла без завесы и с завесой. Эффективность завесы достаточно хорошо обобщается экспериментальным соотношением $\Theta' = (1 + 0,24 K)^{-0,8} (1 + K^2)^{-0,14}$. Здесь $K = z \text{Re}_s^{-0,25} / m_s$,

z — текущая координата вдоль потока, $m_s = \frac{\rho_s u_s}{\rho_0 u_0}$ — параметр вдува, s —

ширина щели, $\text{Re}_s = \frac{\rho_s u_s}{\mu_0}$ — число Рейнольдса. Эксперименты хорошо опи-

сываются предложенным соотношением (рис. 10, где точки — эксперимент, сплошная линия — расчет по обобщенному соотношению, штриховая — эффективность газовой завесы на пластине). Эффективность тепловой завесы в цилиндрическом канале ниже, чем на плоской пластине. Для ее повышения из конструктивных соображений организуется вдув газа под углом к основному потоку [37]. Экспериментально показано, что ядра электрических дуг, горящих в стабилизированном режиме при токах в сотни ампер ($T = (12-18) \cdot 10^3$ К, радиус $(3-10) \cdot 10^{-3}$ м), отдают почти всю энергию излучением в широком спектральном интервале, включая вакуумный ультрафиолет. Последний эффективно поглощается сравнительно холодными слоями газа, внося ощутимый вклад в их тепловое состояние.

Высказанное соображение подтверждается приведенными на рис. 11 зависимостями излучательной способности ϵ_0 и дивергенции вектора излучения $\text{div } E_0$ от температуры плазмы дуги в воздухе и азоте (1, 2 — расчет, точки — эксперимент); ϵ_0 характеризует объемное излучение при $\lambda > 200$ нм, а $\text{div } E_0$ — в более широком спектральном интервале, включая и ультрафиолет с $\lambda < 200$ нм. Примерно 80% излучения дуги поглощается в ультрафиолете, 9% для воздушной дуги поглощается стенкой, а остальная часть энергии излучения идет на нагрев газа, втекающего в приосевую область дуги. Процесс взаимодействия конвекции и излучения в условиях газодинамически стабилизированных режимов горения приводит к постоянству тепловых и электрических характеристик дуги. В турбулентных дугах на фоне радиационно-конвективных процессов теплообмена при достаточно больших токах дуги возможны взаимодействия излучения с турбулентностью, приводящие, согласно численному моделированию в [38], к снижению уровня турбулентной теплопроводности.

Физическая гидродинамика развилась благодаря проблемам в теплофизике движущихся сред и в энергохимических технологиях. Здесь прежде всего необходимо отметить проблему совершенствования фундаментальных представлений о механизмах теплообмена в турбулентных потоках. С помощью электронного стробоскопа для гидродинамических измерений, а также микротермопар получена новая информация о структуре вязкого подслоя и связанных с ней механизмах переноса импульса и тепла в непосредственной окрестности стенки [39, 40]. Синхронные измерения турбулентных пульсаций скорости и температуры установили, что интенсивные гидродинамические «выбросы» и «вторжения», характеризующие течение в вязком подслое, с большой вероятностью сопровождаются аналогичными тепловыми событиями [41].

Особый интерес при изучении турбулентных течений представляет аномальное поведение турбулентного потока при добавлении к нему высокомолекулярных полимеров [42]. Исследования структуры турбулентных потоков при наличии малых полимерных добавок показали, что при снижении сопротивления наблюдается существенное увеличение промежуточной области турбулентного потока и повышение ее термического сопротивления. Добавки полимеров приводят к значительному снижению интенсивности поперечных пульсаций скорости и анизотропии турбулентных вихрей, при этом происходит гашение высокочастотных пульсаций. Характерный масштаб времени когерентных структур растет с повышением эффекта снижения сопротивления.

С увеличением мощности и теплонапряженности агрегатов надежный расчет теплообмена в переходных и аварийных режимах становится особенно важным. Нестационарность теплового процесса может быть вызвана изменением во времени мощности тепловыделения, расхода теплоносителя и его температуры на входе или всех этих параметров одновременно [43].

С помощью автоматизированного стенда измерены значения трения на стенке в различные фазы течения и показано, что их отклонения от квазистационарных значений увеличиваются с ростом темпа изменения расходной скорости, причем в слабых растворах полимеров значительно больше, чем в воде. Изучены статистические характеристики пульсаций температуры и коэффициента теплообмена при нестационарном тепловыделении в стенке канала [44].

В результате обобщения опытных данных по реологическим свойствам жидкостей был выделен класс сред с линейным законом текучести, для которого разработаны методы расчета трения и теплообмена в круглых и плоских каналах при различных граничных условиях с учетом зависимости реологических свойств от температуры и возможного скольжения жидкости на стенке [44].

Предложен структурно-феноменологический подход к описанию неравновесных течений нелинейно-вязкоупругих жидкостей. Выполнены расчеты и эксперименты ламинарных потоков при различных условиях течения в каналах: стационарных, переходных, пульсирующих. Детально изучается пульсирующее и осциллирующее течение растворов полимеров в трубах. Установлены критические условия самопроизвольного возникновения и развития неустойчивого режима течения полимерных жидкостей в каналах, нежелательного для экструзионной технологии.

Газожидкостные и парожидкостные среды имеют широкое применение в энергетике, химической технологии, совместном транспорте нефти и газа и т. п. Экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики и волновых процессов, протекающих в таких средах, в последние годы выделились в особое направление — **волновая динамика газожидкостных систем**.

В области гидродинамики проведен цикл работ по изучению течения газожидкостных смесей в трубах. В горизонтальном двухфазном течении выполнено измерение напряжения трения на стенке и составляющих перепада давления в различных режимах течения — от расслоенного до пробкового и дисперсно-кольцевого. Показано, что коэффициент сопротивления удовлетворительно описывается методами расчета Арманда и Локкарта — Мартинелли, за исключением области малых приведенных скоростей жидкости [45].

На основании измерений спектральной плотности пульсаций напряжения трения на стенке в вертикальном и горизонтальном двухфазном течении предложена объективная методика идентификации режимов течения [46]. Промерены условные характеристики течения в спарянном режиме в моменты прохождения жидких пробок и газовых снарядов и показано, что трение на стенке в жидких пробках вносит наибольший вклад в сопротивление системы [47, 48]. Результаты измерений напряжения трения на стенке и профилей скорости в восходящем двухфазном по-

токе показали существование режима аномально высокого трения в пузырьковом течении в области чисел Рейнольдса до 2000 и выше. Коэффициент трения $\lambda_{тр}$ в этой области может в несколько десятков раз превосходить трение в однофазном потоке даже при малых газосодержаниях β (рис. 12, где d_p — диаметр пузырька) [49, 50].

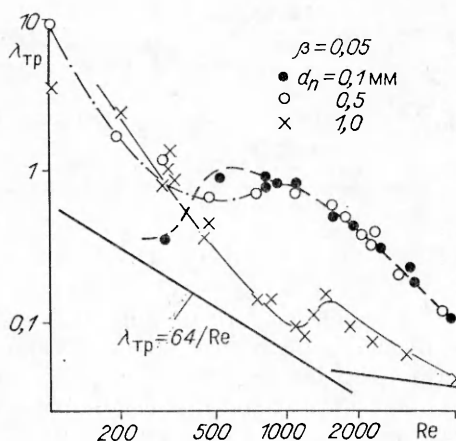
Выполнены измерения компонент пульсаций скорости жидкости в двухфазном течении. Показано, что в отличие от однофазного течения имеет место асимметрия компонент пульсаций в центральной части трубы. Рейнольдсовы напряжения в потоке отличны от нуля даже при докритических числах Рейнольдса, что обусловлено интенсивной турбулизацией потока относительным движением газовой фазы [51, 52].

Гидродинамические характеристики восходящего и опускного двухфазного течения в вертикальной трубе существенно расходятся между собой. Для восходящего течения характерна асимметрия в распределении трения по периметру трубы, вызванная неравномерным распределением газосодержания в пристенном слое. Опускное течение симметричное, газ концентрируется в центре трубы, в ряде случаев имеет место подавление турбулентных пульсаций в пристенной области [53, 54]. Цель этих исследований — построение теории двухфазных течений и методик расчета в интересах химической технологии, энергетики и трубопроводного транспорта.

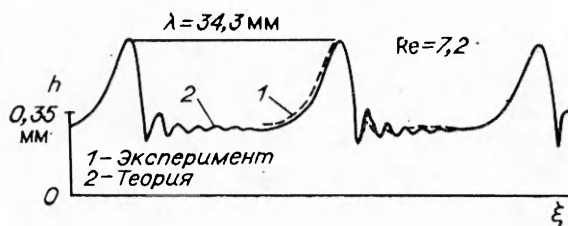
Выполнен цикл работ по изучению гидродинамики и массообмена в стекающих пленках жидкости. Проведены обширные эксперименты по ламинарному и турбулентному режимам течения. Получены данные по скоростям и амплитудам волн, по трению на стенке при ламинарно-волновых и турбулентных режимах течения [55, 56]. Изучено влияние волн на массообмен через свободную поверхность. Профили волн, полученные теоретически [57], количественно хорошо описывают экспериментально наблюдаемые ламинарно-волновые режимы (рис. 13). Исследована устойчивость волн по отношению к малым возмущениям, найдены области устойчивости.

Предложена теоретическая модель, объясняющая усиление массообмена вследствие волнообразования. Ее результаты качественно согласуются с экспериментальными данными [58—60]. Построена теория волн малой и умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками пара и газа, учитывающая все основные особенности двухфазных сред: высокую нелинейность, диссипацию, дисперсию скорости звука, наличие процессов межфазного тепло- и массообмена. Теория основана на канонических приближениях Бюргерса — Кортевега-де Вриза (БКдВ), Буссинеска, релаксационного уравнения БКдВ, уравнения Клейна — Гордона. Разработан также двухволновой подход к анализу эволюции волн с начально крутыми фронтами. Процедура вывода модельных уравнений эквивалентна задаче получения определяющих критериев подобия с целью обобщения опытных данных и создания надежных расчетных методик.

Обнаружены и объяснены новые эффекты волновой динамики пузырьковых сред: сильное влияние свойств газа в пузырьках на эволюцию волн (явление тепловой релаксации ударных волн), возникновение акустических предвестников при распространении волн с крутыми фронтами, значительное увеличение интенсивности ударных волн в парожидкостных средах при определенных условиях.



Р и с. 12



Р и с. 13

Экспериментально обнаружены и теоретически описаны различные волновые режимы в газожидкостной среде: ударные волны с осциллирующим монотонным и переходным (релаксационным) профилями, уединенные волны (солитоны), волновые пакеты. Экспериментально изучены взаимодействия

ударных волн, прохождение солитонов друг через друга (рис. 14). Установлена прямая связь между структурами волн и динамикой паровых и газовых включений. В парожидкостной среде обнаружено существование двух принципиально различных асимптотических режимов протекания волновых процессов: «теплого» и «инерционного».

Построена волновая динамика энергонесущих возмущений давления при снарядной структуре газо- и парожидкостного потока. С использованием математической модели квазиконтинуума получены канонические уравнения, решения которых справедливы при длинах волн, сравнимых с размером снарядной структуры. Сравнение опытных данных для различных структур двухфазного потока с результатом теоретического анализа позволило обобщить все наблюдаемые характерные волновые режимы в зависимости от критериев подобия и определить границы существования этих режимов [57].

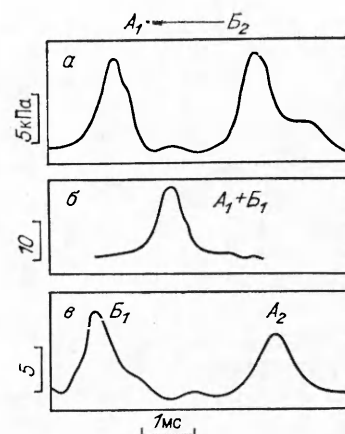
Экспериментально установлено существование ударных волн разрушения в веществе вблизи критической точки жидкость — пар. Критическая точка относится к проблеме фазовых переходов второго рода и объединяет широкий круг физических объектов (жидкий гелий, сверхпроводники, жидкости при обычных и высоких температурах).

Существование ударных волн разрежения обусловлено аномальным уменьшением скорости звука с повышением давления. Получено уравнение, описывающее структуру и динамику ударных волн разрежения [61]. Дальнейшее изучение волновой динамики двухфазных сред связано с решением ряда научных и прикладных задач современной энергетики, химической технологии, криогенной техники, нефтедобывающей промышленности и т. д.

Проведены исследования закрученных газовых завес. Показано существенное влияние на процессы переноса массовых центробежных сил, способных произвести коренную перестройку течения [62, 63]. Предложена теория, определяющая воздействие массовых сил на пульсационное движение [64] и хорошо согласующаяся с экспериментальными данными для различных типов закрученных течений.

Выполнены обширные работы по гидродинамике вращающихся потоков в трубах, циклонах, вихревых камерах, тороидальных вихрях. Разработана теория центробежной форсунки, свободная от произвольных гипотез и эмпирических включений. При этом получена простая неявная формула для определения относительного радиуса ξ приосевой полости в форсунке $\Lambda^2 = [(1 - \xi^2)^2 + 2\xi^2(1 - \xi^2) \ln \xi] / 2\xi^2$, где Λ — величина, определяемая геометрией форсунки.

Изучена проблема устойчивости вращающихся потоков и проведен цикл измерений по механике вязких вихревых потоков (закрученный поток в круглой трубе с непроницаемой и проницаемой стенками). Раз-



Р и с. 14

работана теория концентрированных дисперсных систем, позволившая предсказать явления метастабильности в таких системах [65—67].

Предложен принцип максимальной устойчивости осредненных турбулентных течений, позволивший вычислить эмпирические константы пристенной турбулентности. Разработана теория структурной турбулентности, основанная на представлении о корпускулярном характере структур, возникающих в случайные моменты времени и случайно расположенных и ориентированных в пространстве [68].

Все более отчетливо развивается раздел теплофизики — **криогидродинамика**. Создается экспериментальная база для систематического изучения теплообмена и гидродинамики в условиях свободной и вынужденной конвекции, а также во вращающихся системах криогенных жидкостей. Получены результаты по влиянию вращения криостата на теплоотдачу при кипении. Визуализация процесса позволила впервые показать воздействие силы Кориолиса на гидродинамику и теплообмен при кипении во вращающейся системе [69].

Обработаны опытные данные по влиянию наведенной конвекции в условиях большого объема на величину критического теплового потока при ступенчатом тепловыделении на тонких цилиндрических нагревателях в жидком азоте. Предложена расчетная зависимость для определения минимального теплового потока при возникновении пленочного кипения [70].

Проведен цикл работ по динамике тепловых импульсов в сверхтекучем гелии. Показано, что распространение тепловых возмущений при небольших амплитудах удовлетворительно описывается нелинейной теорией волн второго звука в He-II. По мере увеличения интенсивности импульса наблюдается отклонение от этой теории, обусловленное ростом температуры в пристеночных слоях и последующим образованием паровой пленки. Экспериментально показано, что эти явления связаны с образованием квантовых вихрей в He-II [71].

Динамика разреженных газов — один из фундаментальных разделов физической механики — формулировалась в первые годы становления Института теплофизики. Создан комплекс крупномасштабных вакуумных газодинамических установок с широкими функциональными возможностями и методами диагностики [72] (рис. 15), позволивший радикально расширить физические исследования в области динамики разреженных газов и рассмотреть ряд прикладных проблем [73]. Интерес к релаксации поступательных степеней свободы молекул позволил разработать перспективный метод разделения смесей газов (или изотопов), основанный на явлении пространственного разделения компонентов смеси по массам и сечениям при ее инжекции в поток легкого газа [74].

На протяжении многих лет проводились работы со сверхзвуковой струей газа, истекающей в среду с малым противодавлением (вплоть до вакуума) [75, 76]. Изучены общая структура течений, условия газодинамического подобия, влияние разреженности, разработаны эффективные методы численного расчета [77]. Созданы газодинамические модели структурных течений, позволившие использовать струю как инструмент для изучения неравновесных процессов (вращательной и колебательной релаксации, излучения, конденсации).

Опыты по вращательному энергообмену двухатомных молекул позволили получить для азота константы скорости вращательной релаксации в недоступной ранее области низких температур (до 10 К) для всего набора активных вращательных квантовых уровней. В результате исследования процессов адиабатной нуклеации, формирования кластированных потоков и изучения свойств кластеров показана возможность создания неравновесного по внутренним степеням свободы состояния газа благодаря процессам нуклеации; определены законы подобия неравновесной конденсации молекулярных газов при адиабатном расширении в струях; установлены границы размеров частиц, когда их поверхностная энергия связи и активность обмена молекулярной энергией начинает отличаться



Р и с. 15

от массива; изучены закономерности взаимодействия низкоэнергетических электронов с кластерами летучих неорганических молекул (адгезия, ионизация, диссоциация). При рассмотрении взаимодействия кластеров с поверхностью определены роль фазового состояния кластеров и условия электризации кластеров к поверхности [78—80].

Одним из важных для народного хозяйства практических результатов изучения струй и неравновесных процессов является создание новых струйных средств вакуумной откачки — безмасляных холодных диффузионных насосов и ресурсосберегающих вакуумных и сверхвысоковакуумных насосов.

Создание импульсной лазерной наносекундной диагностики позволило провести локальные измерения в сверхзвуковом потоке с зарождающейся турбулентностью. Экспериментально установлено, что турбулентные моли есть органическая составляющая турбулентного потока и имеют размер, соответствующий числу Кнудсена 0,01. Здесь исследователи вплотную подошли к изучению генерации и диссипации турбулентной энергии на молекулярном уровне.

Анализ основных научных направлений, выполненных в Институте теплофизики СО АН СССР, позволяет определить общие **тенденции развития и проблемы теплофизики**. Прежде всего отмечается существенное расширение рабочих тел и областей их теплофизического приложения. Растет удельный вес работ микрофизического характера по более глубокому изучению свойств веществ. Повышается роль систематизации и обобщения на основе теории подобия накопленных сведений.

В области теплопроводности продолжает расти интерес к краевым задачам с нелинейными уравнениями энергии и граничными условиями, обратным задачам, сопряженным постановкам задач с фазовыми переходами, а также к проблемам тепловых ударов, при которых приходится учитывать влияние теплового возмущения на свойства материала. При этом выделяются постановки задач для полупрозрачных материалов, в которых учитывается объемное поглощение тепловой радиации. Просматривается тенденция увязывать вопросы конструирования материалов с энергетическими процессами, протекающими в них (теплозащитные материалы, оптические кристаллы).

Ожидается развитие теории и методов изучения теплообмена в средах с учетом объемного поглощения, излучения и рассеяния в дву- и трехмерных излучающих системах с селективным характером взаимодействия излучения с веществом в неравновесных условиях. Интерес к объектам приложения при этом существенно расширяется и включает в себя помимо технологических и энергетических проблемы тепловой защиты от интенсивного теплового излучения.

Эксперименты по теплообмену в кипящих и конденсирующихся средах прошли длительную стадию накопления и обработки опытных данных. Тем не менее четкого представления о механизме возникновения кризиса кипения при вынужденном течении, теплообмена вблизи критической точки, конденсации с сопутствующими химическими реакциями и прочих явлений пока не сложилось. В настоящее время важными являются постановки физических экспериментов (с измерением локальных характеристик двухфазных потоков), способствующих совершенствованию физических моделей и построению теории процессов теплообмена в области фазовых переходов жидкость — пар.

Расширяется фронт работ в области свободной конвекции, которая оказывается определяющей во многих технологических процессах и явлениях природы (выращивание кристаллов, микрогравитация жидких сред). В области конвективного тепломассообмена происходит переход от внимания к интегральным характеристикам к изучению внутренних локальных механизмов процесса. Современный уровень развития этой проблемы дает основание на прогресс в понимании механизмов возникновения и зарождения турбулентности, а также взаимодействия вихрей разных масштабов. В понимании тепломассообмена жидкостей с реологическими свойствами просматривается постоянная тенденция к установлению связей макроскопических свойств среды с их микроструктурой.

Перспективно изучение тонкой структуры вихревых течений, определение областей подавления и интенсификации турбулентного переноса в полях массовых сил. Принципиально важен интерес к области структурного анализа турбулентности и построению практически необходимой структурной теории пристенного слоя.

Интенсивно развивается волновая динамика газо- и парожидкостных сред. Исследования базируются на привлечении современных представлений нелинейной волновой динамики и разработках новых методов учета межфазного взаимодействия. Высокая сжимаемость движущихся двухфазных систем сопровождается процессами тепломассообмена, диссипации среды и дисперсии скорости звука. Надежность описания столь сложных процессов обосновывается наиболее полным использованием для их описания современных концепций волновых движений в сочетании с постановкой принципиальных физических экспериментов. При этом особое внимание предлагается уделять изучению турбулентности в зонах отрыва, в системах, где уровень турбулентности сопоставим с характерной скоростью течения, а также математическому и физическому моделированию процессов фильтрации при больших скоростях и теплообмена в пористых средах применительно к проблемам нефтедобычи и химической технологии.

Опыты по теплообмену и гидродинамике в условиях свободной и вынужденной конвекции криогенных жидкостей, будучи весьма трудоемкими в экспериментальном плане, носят комплексный характер, связанный со спецификой физических свойств рабочих тел и необходимостью постановки дополнительных экспериментов теплофизического характера. Особый научный интерес будут представлять дальнейшие изучения нестационарных процессов теплообмена в He-II — квантовой жидкости с необычными механизмами течения и распространения тепловых возмущений.

Комплекс крупномасштабных вакуумных газодинамических установок открывает широкие возможности фундаментальных работ в области

молекулярной физики и газовой динамики. Изучение физических свойств ультрамалых частиц (кластеров), связанное с решением фундаментальных вопросов строения вещества, позволит решить круг материаловедческих, энергетических (горение), экологических и прочих проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С. Теплофизика — наука и инженерное искусство // Современные проблемы теории теплообмена и физической гидродинамики. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984.
2. Теплофизические свойства веществ и материалов/Под ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск, 1979.
3. Теплофизические свойства растворов/Под ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск, 1983.
4. Теплофизические свойства индивидуальных веществ и растворов/Под ред. Н. А. Рубцова и В. А. Груздева. — Новосибирск, 1986.
5. Аверков Е. И., Рубцов Н. А., Тарасов А. Г. Аномальное увеличение спектрального коэффициента отражения углерода при температуре 1200—1400 К в кислородной среде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1977. — № 8, вып. 2.
6. Рубцов Н. А., Емельянов А. А., Пономарев И. Н. Исследования показателя поглощения плавленной окиси алюминия при высоких температурах // ТВТ. — 1984. — Т. 12, № 2.
7. Кутателадзе С. С., Рубцов Н. А., Верте А. Э. Нестационарное взаимодействие теплового излучения с поверхностью чистых металлов // ДАН СССР. — 1971. — № 1.
8. Рубцов Н. А. Теплообмен излучением в сплошных средах. — Новосибирск: Наука, 1984.
9. Кутателадзе С. С., Рубцов Н. А., Бальцевич Я. А. Влияние величины зазора между металлическими пластинами на их тепловое взаимодействие при криогенных температурах // ДАН СССР. — 1978. — Т. 241, № 4.
10. Kutateladze S. S., Berdnikov V. S. Structure of thermogravitational convection in flat variously oriented layers of liquid and on a vertical wall // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1984. — V. 27, N 9.
11. Кутателадзе С. С., Ивакин В. П. и др. Турбулентная естественная конвекция в вертикальном слое // ТВТ. — 1977. — Т. 15, № 3.
12. Kutateladze S. S., Mosevicheva V. N. et al. Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free convection // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1973. — V. 16, N 4.
13. Бобрович Г. И., Гогонин И. И., Кутателадзе С. С. Влияние размера поверхности нагрева на критический тепловой поток при кипении в большом объеме жидкости // ПМТФ. — 1964. — № 4.
14. Kutateladze S. S., Avksentyuk B. P. Heat transfer crisis in liquid helium // Cryogenics. — 1979. — V. 19, N 5.
15. Bobrovich Y. J., Avksentyuk B. P., Mamontova N. N. On the mechanism of boiling of liquid metals // Proc. Semi-Intern. Symp. Heat Transfer. Tokyo: Sept. 4—8, J. Soc. Mech. Engng, 1967.
16. Авксентюк Б. П., Бобрович Г. И. и др. О выражении режима пузырькового кипения в условиях свободной конвекции // ПМТФ. — 1972. — № 1.
17. Авксентюк Б. П., Кутателадзе С. С. Неустойчивость режима теплообмена на поверхностях, объединенных центрами парообразования // ТВТ. — 1977. — Т. 15, № 1.
18. Кутателадзе С. С., Маленков И. Г. Гидродинамическая аналогия теплообмена и кризисы пузырькового режима при кипении и барботаже. Экспериментальные данные. — Новосибирск, 1983. — (Препринт/ИТФ СО АН СССР; № 100—83).
19. Гогонин И. И., Сосунов В. И. и др. Исследование теплообмена при конденсации неподвижного пара на пакетах горизонтальных труб разного диаметра // Теплоэнергетика. — 1983. — № 3.
20. Гогонин И. И., Сосунов В. И. Обобщение экспериментальных данных при конденсации неподвижного пара на пакетах горизонтальных труб // ТОХТ. — 1984. — Т. 18, № 1.
21. Накоряков В. Е., Григорьева Н. И. Расчет тепломассообмена при неизотермической абсорбции на начальном участке стекающей пленки // ТОХТ. — 1980. — Т. 14, № 4.
22. Кутателадзе С. С. Влияние температурного фактора на дозвуковое турбулентное течение газа // ПМТФ. — 1960. — № 1.
23. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962.
24. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергия, 1972.
25. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979.
26. Кутателадзе С. С. Пристенная турбулентность. — Новосибирск: Наука, 1973.
27. Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике. — Новосибирск: Наука, 1982.
28. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука, 1983.
29. Миронов Б. П., Мамонов В. Н. Влияние внешней турбулентности на гидродина-

- мику течения в турбулентном пограничном слое при однородном интенсивном вдуве // Турбулентный перенос со вдувом на поверхности.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980.
30. Васечкин В. Н., Миронов Б. П., Ярыгина Н. И. Влияние предыстории потока на процессы турбулентного теплопереноса // Турбулентный пограничный слой при сложных граничных условиях.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1977.
 31. Миронов Б. П., Васечкин В. Н., Мамонов В. Н., Ярыгина Н. И. Тепломассообмен при повышенной внешней турбулентности в зависимости от интенсивности поперечного потока вещества // Тепломассообмен-VI.— Минск, 1980.— Т. 1, ч. 2.
 32. Лебедев В. П. Экспериментальные исследования турбулентного пограничного слоя на гладкой пластине при ступенчатом подводе тепла // ПМТФ.— 1969.— № 3.
 33. Волчков А. П., Терехов В. И. Турбулентный тепломассоперенос в пограничном слое при наличии химической реакции // Процессы переноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках.— Новосибирск, 1982.
 34. Рубцов Н. А., Пономарев Н. Н. Теплообмен в ламинарном пограничном слое поглощающей и рассеивающей среды на проницаемой пластине // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1984.— № 10, вып. 2.
 35. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы.— Новосибирск: Наука, 1975.
 36. Жуков М. Ф., Лукашов В. П. и др. Электрическая дуга в развитом турбулентном потоке // ИФЖ.— 1986.— № 3.
 37. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С., Засыпкин И. М. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками.— Новосибирск: Наука, 1981.
 38. Рубцов Н. А., Огуречникова Н. М. Влияние турбулентных пульсаций температуры на характеристики электрической дуги // ТВТ.— 1983.— № 6.
 39. Кутателадзе С. С., Миронов Б. П., Накоряков В. Е., Хабахпашева Е. М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений.— Новосибирск: Наука, 1975.
 40. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В., Михайлова Е. С. и др. Методика и результаты исследования пристенной турбулентности в условиях теплообмена и повышенного уровня пульсаций // Тепло- и массообмен.— М.: Энергия, 1968.
 41. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В., Пшеничников Ю. М. и др. Исследование механизма турбулентного обмена в непосредственной близости к стенке // Пристенные турбулентные течения.— Новосибирск, 1984.
 42. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В. Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ // ИФЖ.— 1968.— Т. 14, № 4.
 43. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В., Пшеничников Ю. М., Насибулов А. М. Влияние скорости течения на нестационарный теплообмен при резком изменении теплового потока // Структура гидродинамических потоков. Вынужденное течение, тепловая конвекция.— Новосибирск, 1986.
 44. Кутателадзе С. С., Попов В. П., Хабахпашева Е. М. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью // ПМТФ.— 1966.— № 1.
 45. Накоряков В. Е., Бурдуков А. П. и др. Исследование турбулентных течений двухфазных сред.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1973.
 46. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. и др. Спектральные характеристики вертикального двухфазного потока // ДАН СССР.— 1971.— Т. 200, № 1.
 47. Кашинский О. Н., Козьменко Б. К. и др. Исследование напряжения на стенке в восходящем снарядном режиме // ПМТФ.— 1982.— № 5.
 48. Nakoryakov V. E., Kashinsky O. N., Kozmenko B. K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe // Intern. J. Multiphase Flow.— 1986.— V. 12, N 3.
 49. Nakoryakov V. E., Kashinsky O. N. et al. Local characteristics of upward gas-liquid flow // Intern. J. Multiphase Flow.— 1981.— V. 2, N 1.
 50. Валукина Н. В., Козьменко Б. К., Кашинский О. Н. Характеристики монодисперсной газожидкостной смеси при течении в вертикальной трубе // ИФЖ.— 1979.— Т. 36, № 4.
 51. Кашинский О. Н., Козьменко Б. К., Накоряков В. Е. Исследование пульсационных характеристик восходящего газожидкостного потока // ПМТФ.— 1981.— № 6.
 52. Накоряков В. Е., Кашинский О. Н., Козьменко Б. К. Электрохимический метод исследований турбулентных характеристик двухфазных потоков // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1984.— № 14, вып. 2.
 53. Накоряков В. Е., Кашинский О. Н. и др. Исследование восходящего пузырькового течения при малых скоростях жидкой фазы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1986.— № 16, вып. 3.
 54. Бурдуков А. П., Козьменко Б. К., Накоряков В. Е. Распределение профилей скорости жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях // ПМТФ.— 1975.— № 2.
 55. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах.— Новосибирск: Наука, 1984.
 56. Накоряков В. Е., Покусев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1983.

57. Kuznetsov V. V., Nakoryakov V. E. et al. Propagation of perturbation in gas-liquid mixture // J. Fluid Mech.— 1978.— V. 85, N 1.
58. Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волнообразование при течении пленки жидкости на вертикальной стенке // ПМТФ.— 1979.— № 6.
59. Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G. Wave formation on a vertical fallary liquid film // Amer. Ins. Chem. Engng J.— 1985.— V. 31(a).— P. 1446.
60. Трифонов Ю. Я., Цвелодуб О. Ю. Нелинейные волны на поверхности пленки жидкости, стекающей по вертикальной стенке // ПМТФ.— 1985.— № 5.
61. Borisov A. A., Borisov A. I. et al. Rarefaction shock wave near the critical liquid-vapourpoint // J. Fluid Mech.— 1982.— V. 126.— P. 59.
62. Volchikov E. P., Lebedev V. P., Shishkin H. E., Dvornikov N. A. Investigation of swirling film cooling in the initial tube section // 6th Int. Heat Transfer Conf.— Toronto, 1978.— V. 5.
63. Волчков Э. П., Дворников Н. А., Терехов В. И. К расчету закрученной газовой завесы в цилиндрическом канале // ПМТФ.— 1986.— № 4.
64. Дворников Н. А., Терехов В. И. О переносе импульса и тепла в турбулентном пограничном слое на криволинейной поверхности // ПМТФ.— 1984.— № 3.
65. Гольдштик М. А., Штерн В. Н. Гидродинамическая устойчивость и турбулентность.— Новосибирск: Наука, 1977.
66. Гольдштик М. А. Вихревые потоки.— Новосибирск: Наука, 1981.
67. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984.
68. Структурная турбулентность/Под ред. М. А. Гольдштика.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1982.
69. Луцет М. О., Жуков В. Е., Кондаурова Л. П. Визуализация процессов теплообмена во вращающемся криостате, сила Кориолиса и первый кризис кипения // Теплообмен при фазовых превращениях.— Новосибирск, 1983.
70. Павленко А. Н., Чехович В. Ю. Кризис теплоотдачи при нестационарном тепловыделении на тонких нагревателях // Теплофизика и гидродинамика в процессах кипения и конденсации.— Новосибирск, 1985.
71. Немировский С. К., Цой А. Н. О генерации вихрей в He-II мощным тепловым импульсом // Письма в ЖЭТФ.— 1982.— Т. 35, вып. 6.
72. Экспериментальные методы в динамике разреженных газов.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1974.
73. Кутателадзе С. С., Ярыгин В. Н., Ребров А. К. Некоторые проблемы молекулярной газодинамики // Вестн. АН СССР.— 1984.— № 4.
74. Куснер Ю. С., Кутателадзе С. С. и др. Инерционное газокинетическое разделение газовых смесей и изотопов // ДАН СССР.— 1979.— Т. 247, № 4.
75. Rebrov A. K. Experimental study of relaxing low-density flows // Xth Intern. Symp. on RGD.— N. Y., 1977.— Pt II.
76. Чекарев С. Ф., Станкус Н. В. Газодинамическая модель и соотношения подобия для запуска сверхзвуковых сопел и струй // ЖТФ.— 1984.— Т. 54, вып. 8.
77. Чекарев С. Ф., Сквородко П. А. Маршевый метод расчета двумерных сверхзвуковых течений вязкого газа в естественных координатах.— Новосибирск, 1981.— (Препринт/ИТФ СО АН СССР; № 71—81).
78. Карелов Н. В., Ребров А. К., Шарафутдинов Р. Г. Заселенность вращательных уровней молекул азота при неравновесной конденсации в свободно расширяющемся газе // ПМТФ.— 1978.— № 3.
79. Mironov S. G., Rebrov A. K. et al. Molecular clusters: formation in free expansion and with vibrational energy pumping; cluster-surface interaction // Surface Science.— 1981.— V. 106.— P. 242.
80. Новопапин С. А., Перепелкин А. Л., Ярыгин В. Н. Обнаружение квазичастиц в турбулентном слое смешения сверхзвуковой струи // Письма в ЖЭТФ.— 1986.— Т. 44, вып. 7.

Поступила 26/XII 1986 г.

УДК 531

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА В СО АН СССР

Б. Д. Аннин, А. Ф. Ревуженко, Е. И. Шемякин

(Новосибирск)

С начала создания Сибирского отделения в 1957 г. при определении основных направлений развития механики его организаторы придавали большое значение механике деформируемого твердого тела. Это было связано как с решением ряда актуальных динамических задач прочности, так и с общими проблемами развития машиностроения. Так сложилось, что из первоначального плана развития этого направления в Институте теоретической и прикладной механики (акад. С. А. Христианович) родился новый план — развитие как основы всего направления экспериментального