

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 3.5.

ОБЩАЯ МЕХАНИКА, ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ, ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И УПРАВЛЯЕМЫХ АППАРАТОВ; БИОМЕХАНИКА; МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ, НЕИДЕАЛЬНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ СРЕД; МЕХАНИКА ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Программа 3.5.1. Построение и анализ новых математических моделей движения сложных сред (координатор акад. Л. В. Овсянников, зам. координатора докт. физ.-мат. наук А. П. Чупахин)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева предложена модель мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере, описывающая крупномасштабные движения газа в атмосферах планет и жидкости в Мировом океане. Найдена область применимости модели и доказано сохранение потенциальной завихренности вдоль траекторий. Уравнения стационарных движений мелкой воды представлены в виде интегралов Бернулли и потенциальной завихренности, связывающих глубину жидкости и функцию тока. Найдены простейшие стационарные решения уравнений, описывающие состояние равновесия, отличающиеся от сферически-симметричного, и зональные течения вдоль параллелей. Показано, что стационарные уравнения модели допускают бесконечномерную группу Ли эквивалентности.

В том же Институте изучено распространение звуковых возмущений на состоянии

равновесия. Система уравнений для бихарактеристик проинтегрирована в эллиптических функциях. Приведено описание простых стационарных волн, в которых все величины зависят лишь от широты. На рис. 18 изображен характеристический коноид для различных скоростей вращения сферы при больших временах распространения возмущения.

В том же Институте доказано существование двух типов решений (сверх- и докритического), описывающих движение газа в сферическом поясе, такое что одна из граничных параллелей является источником, а другая — стоком. Дана интерпретация полученных решений как крупномасштабных циркуляционных ячеек в атмосфере. Выписана система интегральных законов сохранения массы, полного импульса и полной энергии. Показано, что последний является выпуклым расширением двух первых. Выписаны условия Гюгонио на

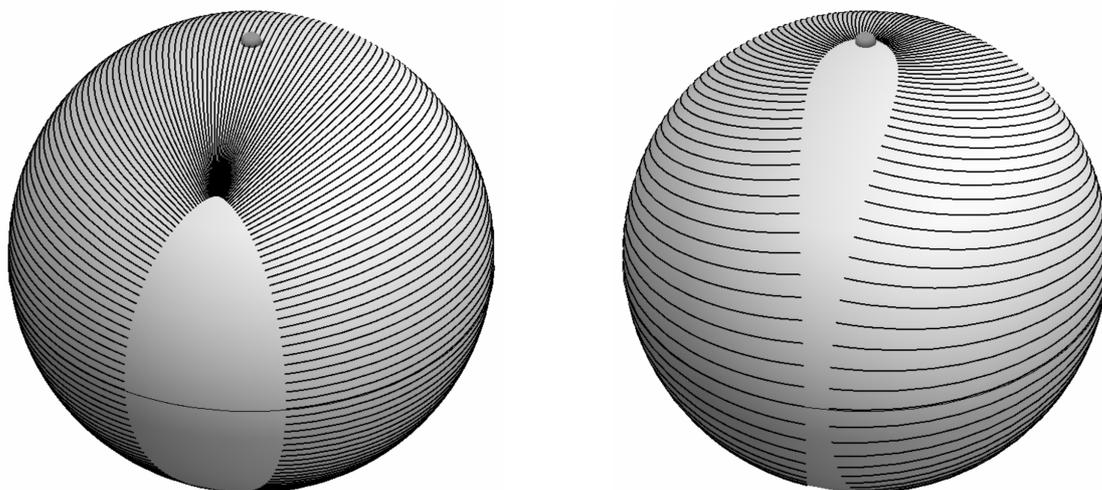


Рис. 18. Характеристический коноид с вершиной, расположенной на экваторе, при больших временах распространения возмущения: слева — при умеренной скорости вращения; справа — при большой.

разрывах, показано, что полная энергия потока сохраняется на контактных разрывах и уменьшается на устойчивых сильных разрывах типа бора. Построены разрывные решения в классе стационарных волн со ступенчатым профилем глубины — бор на сфере (рис. 19). Выписаны условия существования таких решений в форме аналога ударной адиабаты.

В Институте вычислительного моделирования изучено влияние радиационного потока солнечной энергии на возникновение конвекции в двухслойных жидких системах. Найдены точные решения, описывающие состояние механического равновесия. В рамках линейной теории исследована устойчивость полученных решений. На основе численных расчетов доказана неустойчивость равновесия и выявлено, что теплообмен через свободную поверхность имеет стабилизирующее влияние.

В том же Институте проведено теоретическое исследование термокапиллярных течений в двухфазной системе, состоящей из бесконечного жидкого цилиндра, обдуваемого потоком газа. Слой газа ограничен внешней твердой стенкой. Найдено точное решение, описывающее стационарное движение, и исследованы возможные режимы течений. Изучена устойчивость данных режимов по отношению к малым возмущениям (трехмерные нормальные возмущения). Показано, что если направление прокачки газа совпадает с направлением термокапиллярного течения на границе раздела

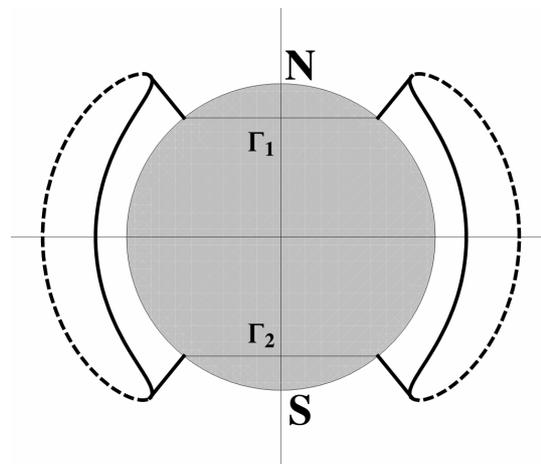


Рис. 19. Типичные профили глубины на сфере: сплошные линии — сверхкритическое течение; штриховые — докритическое течение.

(расход газа $Q < 0$), то граница устойчивости (критическое число Марангони) понижается по сравнению со случаем $Q = 0$. При изменении направления прокачки на противоположное ($Q > 0$) устойчивость системы повышается. Увеличение расхода при фиксированном значении числа Марангони приводит к подавлению термокапиллярного течения в жидкости потоком газа. При дальнейшем увеличении Q направление термокапиллярного движения на границе раздела меняется. Данный режим является устойчивым при небольших числах Марангони и расходах газа.

Программа 3.5.2. Волновые процессы, организованные структуры и турбулентность в одно- и двухфазных потоках (координатор член-корр. РАН С. В. Алексеев)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутададзе проведено экспериментальное исследование турбулентной структуры различных режимов горения незакрученных и закрученных пламен, а также выполнен анализ роли нестационарных вихревых структур в механизме стабилизации пламени и интенсивности генерации акустического шума. С помощью современных кросскорреляционных алгоритмов обработки изображений, автоматически учитывающих локальную концентрацию трассерных частиц, локальный градиент поля скорости и т. д., получены ансамбли полей мгновенной скорости и завихренности (рис. 20). Высо-

кая точность измерения позволила впервые полноценно исследовать турбулентную структуру потока (пространственные распределения средней скорости и напряжений Рейнольдса) при характерных режимах горения закрученных пламен. Регистрация мгновенной формы фронта пламени при помощи высокочувствительной ICCD-камеры позволила сопоставить пространственную структуру и интенсивность крупномасштабных вихревых структур с интенсивностью генерируемого пламенем акустического шума. Новая экспериментальная информация о механизме стабилизации закрученных турбулентных пламен пригодна для

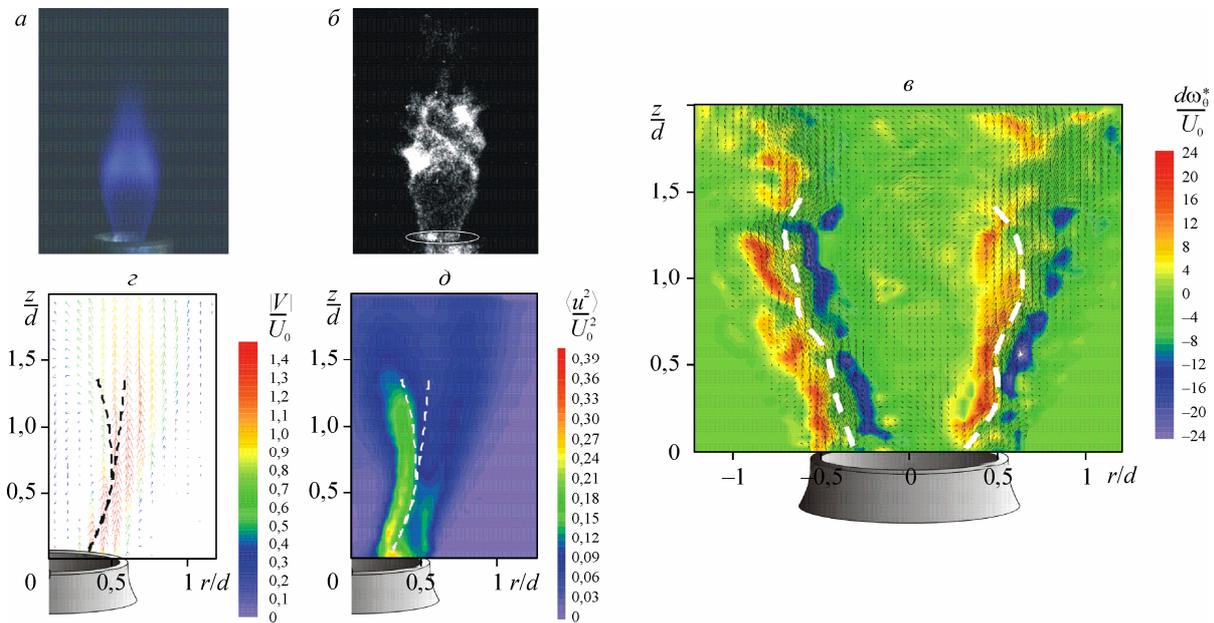


Рис. 20. Структура обедненного режима ($\Phi = 0,68$, $U_0 = 7,2$ м/с) горения сильнозакрученного ($S = 1,0$) турбулентного пламени ($Re_{air} = 6\ 800$).

a — фотография; *b* — фотография хемилюминесценции СН (экспозиция ICCD-камеры 20 мкс); *в* — мгновенное поле скорости и завихренности; *г* — поле средней скорости; *д* — пространственное распределение аксиальной компоненты кинетической энергии турбулентности.

верификации методов численного расчета нестационарных реагирующих течений и при проектировании эффективных горелочных устройств.

В том же Институте проведен анализ осаждения частиц из турбулентного потока на ограничивающие поверхности при больших числах Рейнольдса потока $Re_+ \gg 1$ и значениях параметра инерционности $\tau_+ \ll Re_+$. Для диф-

фузионно-импактного режима и инерционного режима осаждения частиц впервые получены асимптотические выражения для скорости осаждения, хорошо согласующиеся как с имеющимися экспериментальными данными, так и с данными DNS- и LES-моделирования (рис. 21). Показано, что в диффузионно-импактном режиме ($0,1 \leq \tau_+ \leq 10$) существенно влияние броуновской диффузии, которым в ряде работ

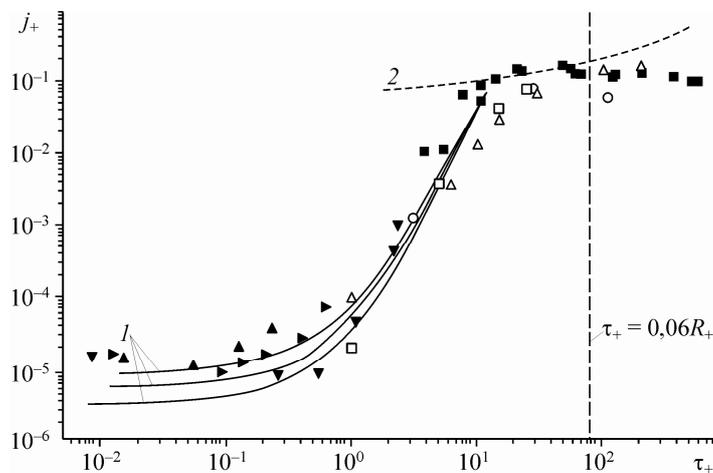


Рис. 21. Результаты расчета коэффициента осаждения по асимптотическим закономерностям для диффузионно-импактного (1) и инерционного (2) режимов осаждения по результатам различных экспериментов.

пренебрегалось. Впервые показано, что в логарифмическом слое профили концентрации и моментов пульсационной скорости частиц являются универсальными функциями координаты $y_p = y_+/\tau_+ = y/(v_\tau \tau_p)$, причем в интервале расстояний от стенки $\tau_+ \ll y_+ \ll R_+$ справедлив характерный для безынерционной примеси логарифмический закон распределения концентрации частиц. Получены составные разложения для концентрации частиц и вторых моментов пульсаций скорости частиц в логарифмическом слое, равномерно пригодные во всей области изменения параметра τ_+ .

В том же Институте выполнен цикл работ по теоретическому изучению двумерной структуры течения, индуцируемого в тонких слоях жидкости за счет термокапиллярного эффекта при движении локального источника тепла. Принципиальная новизна задачи связана с качественным отличием равномерного профиля скорости в слое от параболического (при течении под действием гравитации) и линейного (при течении, индуцированном потоком газа). В длинноволновом приближении получено стационарное уравнение для толщины слоя жидкости с учетом скорости движения источника тепла. Проанализированы условия возникновения вихревой структуры и относительный вклад основных физических механизмов (термокапиллярные силы, силы инерции, поверхностное натяжение, гидростатика, нелинейность). Показано, что основное стабилизирующее воздействие оказывают кинематический эффект (инерция) и вязкость, обеспечивающие существование режимов течения без образования сухих пятен (разрывов) (рис. 22). В реализации этих режимов объемные силы не принимают участия, что означает применимость результатов для случая микрогравитации или невесомости. Полученные результаты

обосновывают новый подход к экспериментальному изучению физики процессов в тонких неизотермических слоях (пленках) жидкости, обладающий важными преимуществами по сравнению с широко применяемыми подходами к исследованию пленочного течения под действием гравитации или потока газа.

В широком диапазоне физических параметров проведено систематическое экспериментальное исследование разрушения не догретой до температуры насыщения пленки жидкости, движущейся под действием силы тяжести по плоским локальным нагревателям различного размера. Обнаружено, что пороговый тепловой поток для разрыва пленки на два порядка выше для источников тепла малого размера, чем для протяженных поверхностей. Протяженность нагревателя является важнейшей характеристикой, определяющей разрыв пленки (рис. 23). Экспериментальные данные по разрыву пленки в диапазонах чисел Рейнольдса 0,15—1500, размера нагревателя 2,2—2200 мм, угла наклона пластины к горизонту 1—90°, теплового потока 0,1—50 Вт/см² для шести жидкостей с существенно различными свойствами обобщены единой критериальной зависимостью. Установлено, что формирующееся струйное течение ограничивает распространение сухих пятен по нагревателю в поперечном направлении, препятствуя возникновению кризиса теплообмена при появлении первого сухого пятна. Применение различных покрытий и жидкостей доказывает, что равновесный краевой угол смачивания не оказывает определяющего влияния на термокапиллярный разрыв пленки жидкости. Показано, что использование продольного оребрения на нагревателе позволяет существенно увеличить пороговый тепловой поток для разрыва пленки. Установлено, что пленка внезапно разрывается в

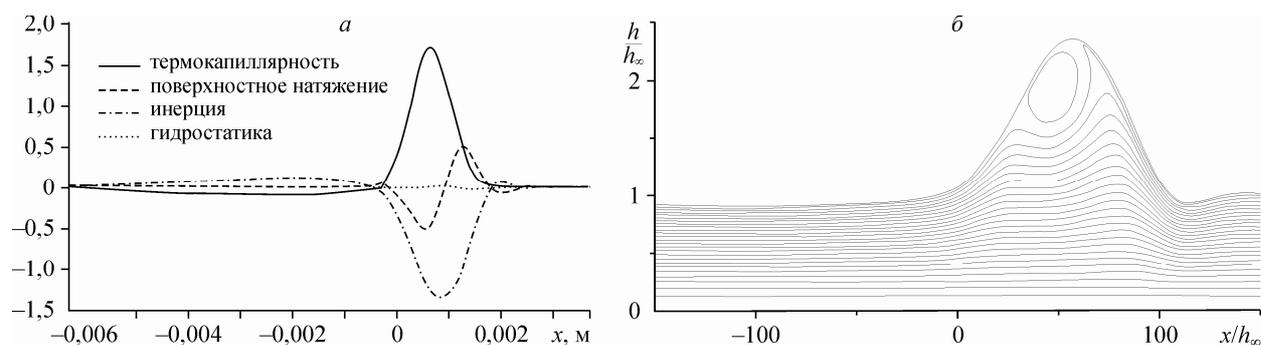


Рис. 22. Баланс эффектов при формировании волновой структуры в слое жидкости (а); относительная деформация слоя жидкости и линии тока (б).

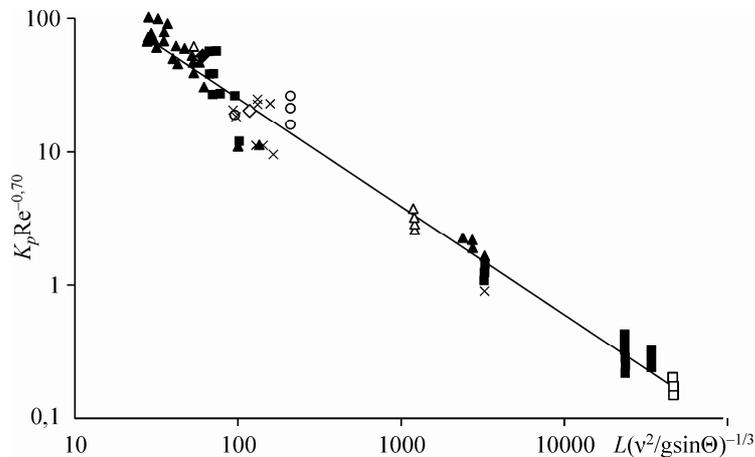


Рис. 23. Влияние размера нагревателя $L = 2,2—2200$ мм на термокапиллярный разрыв пленки жидкости, где $K_p = -q_{идп}(d\sigma/dT)/(\lambda\rho(gv\sin\Theta)^{2/3})$ — критерий разрыва.

Жидкости: вода, 10- и 25%-е растворы этилового спирта в воде, 50%-й раствор глицерина в воде, этиленгликоль, MD-3F. Значки — результаты экспериментов.

момент, когда ее толщина достигает определенной критической толщины, практически не зависящей от расхода жидкости и угла наклона пластины. Разрыв происходит с формированием на нагревателе очень тонкой «остаточной пленки» и ее последующим разрушением и высыханием.

Впервые показаны предельные возможности для отвода тепла стекающими пленками жидкости. Полученные результаты и обобщающие расчетные соотношения позволяют осуществлять научно обоснованный выбор оптимальных размеров и параметров работы различных пленочных аппаратов, характеризующихся возможностью развития сухих пятен.

Программа 3.5.3. Гидродинамические явления в природных и технических системах (водотоках и водоемах, нефте- и газопроводах, пористых средах, тепловых энергетических установках) (координатор член-корр. РАН В. В. Пухначев)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева предложен новый метод измерения характеристик пространственных полей внутренних волн с помощью компьютерного анализа смещений флуоресцентных прослоек в непрерывно стратифицированной жидкости. Для вычисления положения максимумов светимости прослоек использован взаимно-корреляционный анализ с применением тестовой функции. С помощью этого метода выполнена верификация линейной теории внутренних волн, генерируемых колебаниями сферы в однородно стратифицированной вязкой жидкости, выявлены недостатки ранее применявшейся экспериментальной методики, проведено исследование пространственной структуры полей внутренних волн в окрестности колеб-

лющейся сферы. Показано, что поля внутренних волн, соответствующих фундаментальной и удвоенной частоте колебаний, имеют разные диаграммы направленности излучения (дипольного и квадрупольного типа соответственно). Практическим приложением проведенных исследований является задача о структуре бароклинного прилива в окрестности изолированного препятствия. Полученные данные указывают на необходимость учета эффектов ближнего поля в окрестности препятствия, а также нелинейных эффектов для кратных по частоте гармоник. Большинство существующих моделей генерации бароклинных приливов основаны на линейном подходе и теории дальнего поля. На рис. 24 показана картина внутренних волн в вертикальной плоскости, ориентиро-

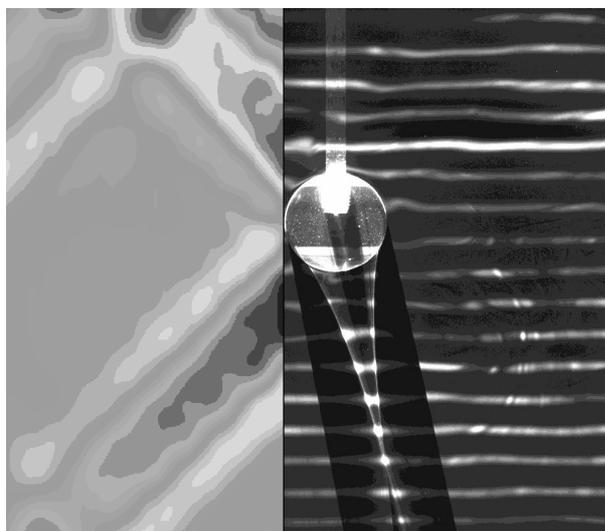


Рис. 24. Исходная картина внутренних волн и результат ее обработки (фрагмент слева).

Поясн. см. в тексте.

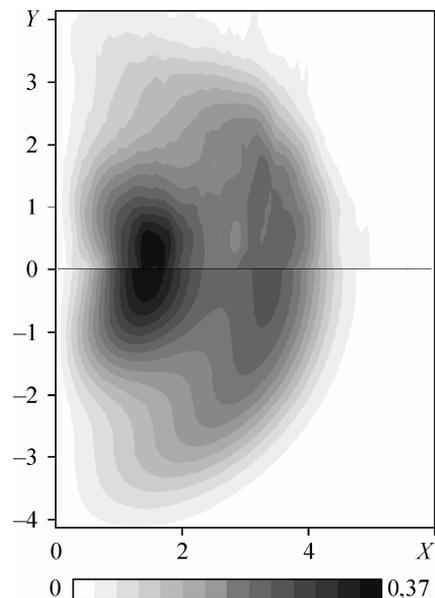


Рис. 25. Распределение амплитуд поля внутренних волн (горизонтальное сечение).

Поясн. см. в тексте.

ванной в направлении колебаний сферы (в левой части — результат обработки). На рис. 25 показаны результаты измерений (вверху) и расчетов (внизу) пространственного распределения амплитуд внутренних волн в горизонтальной плоскости, расположенной на расстоянии $2,89R$ от центра сферы, где R — радиус сферы. Расстояния на рис. 25 нормированы на радиус сферы, уровни серого соответствуют амплитудам волн, нормированным на амплитуду колебаний сферы.

В том же Институте на основе модифицированного метода встречных прогонок предложен способ построения точного дискретного аналога (разностной схемы) для краевой задачи для линейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с малым параметром (ε) при старшей производной. Отличие рассматриваемого способа построения разностной краевой задачи от традиционных заключается в том, что для вычисления коэффициентов и правой части разностных уравнений решаются задачи Коши для уравнений первого порядка специальной структуры. В линейном случае проведено подробное обоснование метода. Получена оценка нормы обратного оператора и решения дискретной задачи. Исследовано влияние погрешностей, возникающих при вычислении коэффициентов и правой части разностных уравнений, на решение задачи. Предложенный метод обобщается на случай сингулярно возмущенных краевых задач, когда заранее неизвестно расположение

пограничных или переходных слоев и параметр $\varepsilon \rightarrow 0$. На примере модели Лагерстрома—Коула впервые численно получены слабоустойчивые решения с высокой точностью. При этом, в зависимости от задания граничных условий, решение исходной задачи ($\varepsilon = 0$) мо-

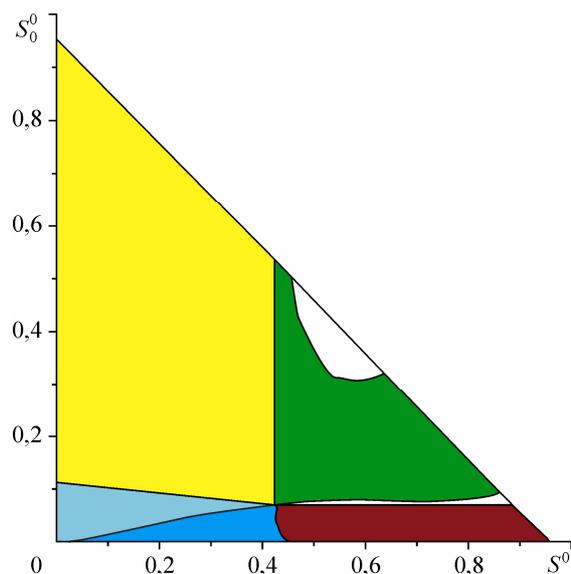


Рис. 26. Области начальной насыщенности пласта нефтью (S_0^0) и газом (S^0), соответствующие шести случаям взаимного расположения фронтов вытеснения фаз. Диаграмма построена для отношения динамической вязкости воды и нефти $\alpha = 0,33$ и отношения вязкости воды и газа $\alpha_0 = 50$.

жет быть и сколь угодно гладким, и непрерывным, или иметь разрыв.

В том же Институте детально исследованы процессы перераспределения несмешивающихся фаз и обмена солями между относительно пресным фильтратом бурового раствора и пластовой водой. Показано, что однотипное взаимное расположение фронтов вытеснения и границы раздела водных растворов может соответствовать одному из шести случаев. Для широкого диапазона начальной насыщенности порового пространства пласта каждым из флюидов очерчены области, соответствующие этим случаям (рис. 26). Впервые в мировой практике разработан метод количественной интерпретации данных скважинного электро-

магнитного зондирования пластов, содержащих три фазы (вода, нефть, газ). Решение возникающей при этом обратной задачи позволяет определить начальные насыщенности месторождения нефтью и газом и проницаемость коллектора. Впервые область начальной насыщенности флюидами разделена на подобласти, в каждой из которых фронты вытеснения фаз в зоне проникновения сохраняют свой порядок взаимного расположения. Это позволяет сузить поиск идентификации данных измерений для конкретного сочетания насыщенностей фаз. Полученные результаты применимы к количественной интерпретации данных электромагнитного зондирования пластов приборами типа ВИКИЗ при проходке скважин.

Программа 3.5.4. Влияние локального силового и энергетического воздействия на до-, сверх- и гиперзвуковые течения (координатор акад. В. М. Фомин)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича разработан новый интерференционный метод регистрации/визуализации полей давления. Дано теоретическое обоснование и разработана схема ре-

ализации метода. Датчиком служит слой прозрачного упругого вещества, нанесенного на поверхность модели и меняющего свои свойства под действием исследуемого параметра. В свете, отраженном от двух поверхностей слоя,

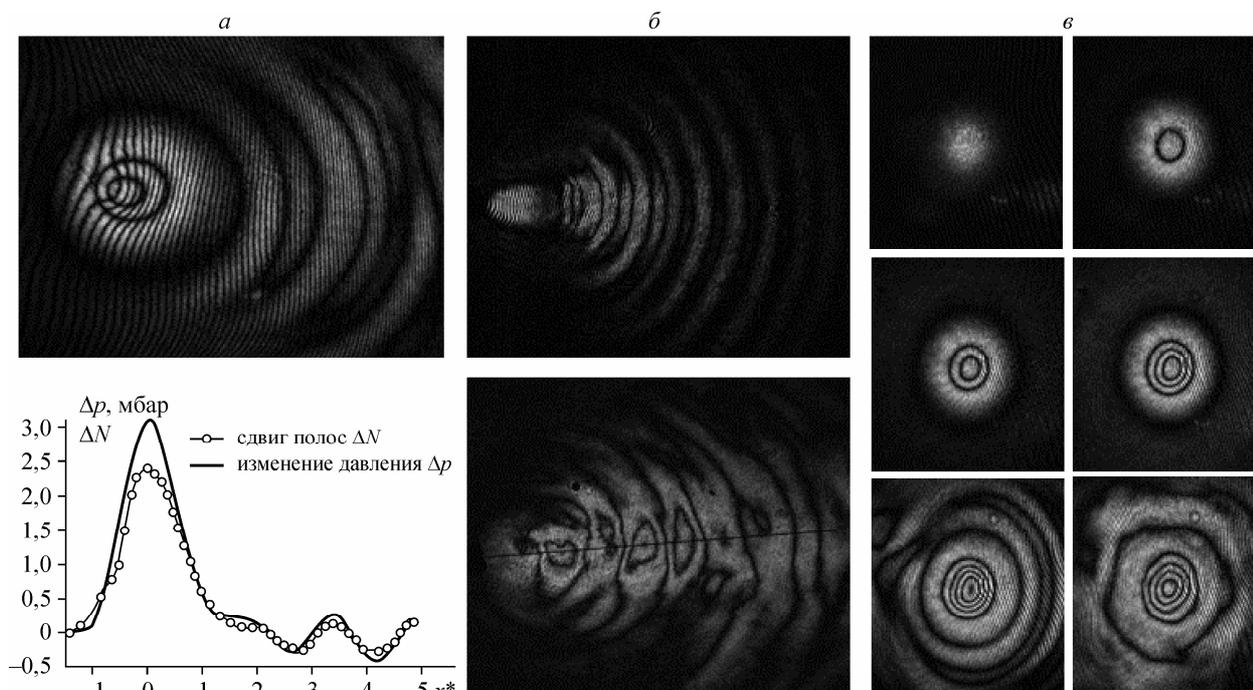


Рис. 27. Визуализация в муаровых полосах полей давления от струи, набегающей на поверхность:

a — $\varphi = 45^\circ$, поле давления (сверху), распределение величин (снизу); *б* — $\varphi = 25^\circ$, обработанный срез трубки (сверху) и необработанный — «слово» (снизу); *в* — $\varphi = 90^\circ$, эволюция полей давления от ортогональной струи при увеличении ее скорости.

регистрируются интерферограммы, сдвиг полос на которых зависит от величины давления (рис. 27). Чувствительность метода составляет до 1 см вод. ст. на одну интерференционную полосу, что при использовании современных методов обработки интерферометрических данных позволяет регистрировать (визуализировать) поля давлений, характеризующиеся величинами 0,1 мм вод. ст. Быстродействие таких покрытий (время отклика), в зависимости от используемого материала, составляет несколько микросекунд. Это дает возможность регистрировать быстропротекающие процессы, что с успехом было использовано для визуализации поля давления за ударной волной на стенке ударной трубы. Перечисленные характеристики метода позволяют в динамике изучать до- и сверхзвуковые процессы обтекания тел.

В том же Институте для целей обработки экспериментальных данных разработаны принципиально новые эффективные численные методы решения линейных интегральных уравнений Фредгольма и Вольтерра 1-го рода. Методы не «портят» исходные уравнения, и в отличие от классических методов в них отсутствует проблема выбора параметра регуляризации.

Разработаны теоретические модели процессов горения углеводородных топлив в микросистемах в условиях, когда характерные размеры устройства и состав смеси близки к своим критическим значениям. Впервые показано, что для корректного описания динамики пламени в микросистемах необходимо учитывать ускорение фронта пламени. Впервые построена мо-

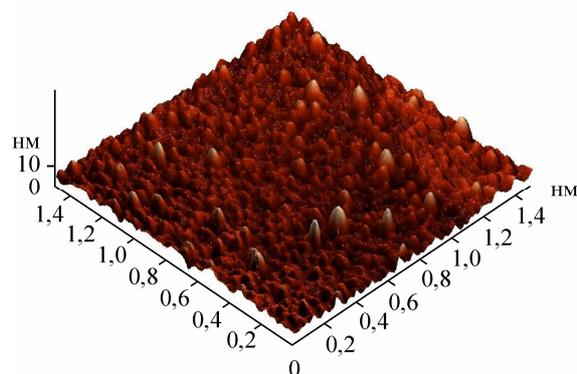


Рис. 28. Поверхность алмазоподобной пленки.

дель спирального вращающегося пламени и получены решения, описывающие бегущие волны на фронте пламени при горении газа в радиальном канале с градиентом температуры.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование устойчивости безградиентного пограничного слоя на вогнутой стенке к нестационарным вихрям Гёртлера (включая квазистационарные). Найдены все основные характеристики устойчивости течения в зависимости от частоты и поперечного волнового числа. Получено согласование линейной теории и эксперимента для гёртлеровской неустойчивости как в стационарной, так и в нестационарной постановке.

Получены режимы работы МГД-реактора, при которых в результате реакции пиролиза природного газа образуется алмазоподобная пленка толщиной менее 100 нм, имеющая поликристаллическую структуру (рис. 28).

Программа 3.5.5. Аэродинамика и термодинамика элементов сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов нового поколения (координатор докт. физ.-мат. наук А. А. Маслов)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича экспериментально установлено, что на модели стреловидного крыла при сверхзвуковом обтекании линия ламинарно-турбулентного перехода параллельна передней кромке крыла (рис. 29), независимо от угла стреловидности. Тем самым обосновывается возможность использования упрощенной модели (скользящего крыла) для теоретических и экспериментальных исследований нестационарных процессов в

областях перехода сверхзвуковых трехмерных пограничных слоев.

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича ведутся работы по созданию новой гиперзвуковой аэродинамической трубы АТ-304, которая по уровню реализуемых параметров (чисел Рейнольдса) будет превышать существующий мировой уровень в гиперзвуковом диапазоне скоростей. Новый источник обеспечит продолжительность испытаний в аэродинамической тру-

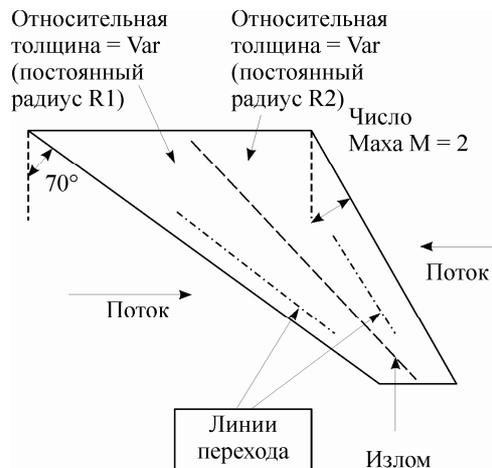


Рис. 29. Линия ламинарно-турбулентного перехода параллельна передней кромке крыла.

бе не менее 0,1 с за счет увеличения объема форкамеры при одновременном уменьшении конструкторских и технологических проблем, связанных с изготовлением и эксплуатацией установки, что важно для достижения высоких параметров моделирования потоков в наземных аэродинамических установках, необходимых при создании перспективных высокоскоростных летательных аппаратов.

В том же Институте при исследовании обтекания крылатой модели космического аппарата «Клипер» при спуске с орбиты на высотах от 150 до 40 км получены зависимости аэродинамических характеристик от высоты полета. Методом прямого статистического моделирования Монте-Карло были обнаружены зоны экстремального нагрева на крыльях, показано, что их положение обусловлено падением головной ударной волны на крыло и зависит от скорости и высоты полета. Детальное распределение поверхностных характеристик (давления (рис. 30), коэффициентов трения и теплопередачи (рис. 31) и др.) и поля течения для

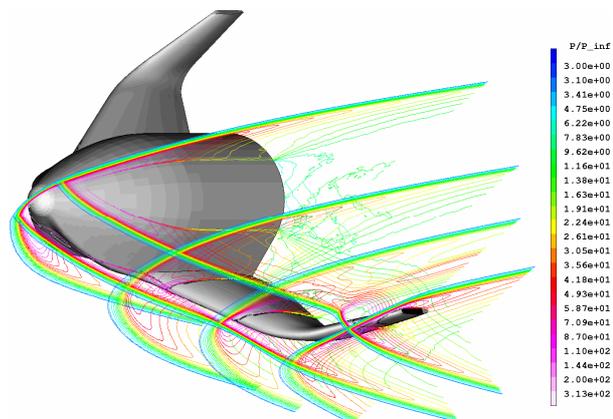


Рис. 30. Поле давления на высоте 95 км. Давление в точке падения ударной волны резко возрастает.

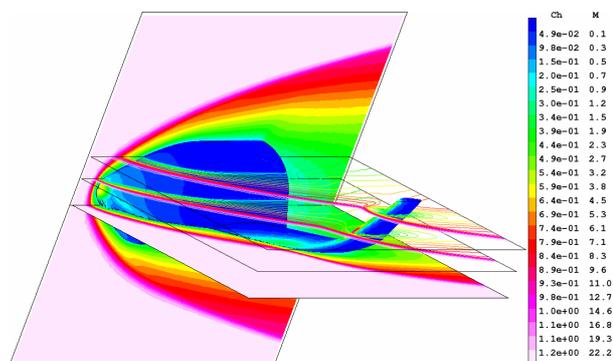


Рис. 31. Поле локального числа Маха и распределение коэффициента теплопередачи. В точке падения головной ударной волны на поверхности образуется локальный максимум значения коэффициента теплопередачи.

некоторых точек траектории были получены методом прямого статистического моделирования Монте-Карло. Расчеты интегральных аэродинамических характеристик выполнялись с помощью локально-мостового инженерного метода.

Программа 3.5.6. Детонационные и ударно-волновые процессы в газовых, гетерогенных и конденсированных средах (координатор акад. В. М. Титов)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева разработаны низкоскоростные эмульсионные ВВ (ЭМВВ) на основе субмикронной эмульсии типа «вода в масле». В состав эмульсии входит водный раствор окислителя — смеси аммиачной и натриевой селитры, и горю-

чее — смесь парафина (или индустриального масла) и эмульгатора. Особенностью данных ЭМВВ является большое количество полых микросфер из стекла диаметром около 60 мкм, играющих роль центров инициирования реакции — «горячих точек». Эти ВВ обладают вы-

сокой детонационной способностью, сравнимой с индивидуальными вторичными ВВ. Скорость детонации низкоскоростных ЭмВВ составляет 1,8—3,3 км/с, детонационное давление — 0,5—2,5 ГПа. При концентрации микрорпор более 20 % композиции отличаются слабой зависимостью скорости детонации от диаметра цилиндрического или толщины плоского заряда ВВ (рис. 32), что связано, по-видимому, с высокой степенью взрывного превращения ультрадисперсной эмульсии и малой шириной зоны реакции.

Детонационные характеристики низкоскоростных ЭмВВ позволяют использовать их в приложениях, где необходимо минимизировать или варьировать взрывную нагрузку на обрабатываемые материалы, например, патронированные эмульсионные ВВ малого диаметра различной мощности и т. п. Показано, что низкоскоростные эмульсионные ВВ могут быть использованы для нанесения защитных покрытий при плакировании металлов тонкими фольгами от дюралюминия до молибдена толщиной до 100—300 мкм, без амортизирующего слоя между ВВ и ударником (рис. 33), а также для сварки взрывом металлической трубки малого диаметра с моделью трубной доски.

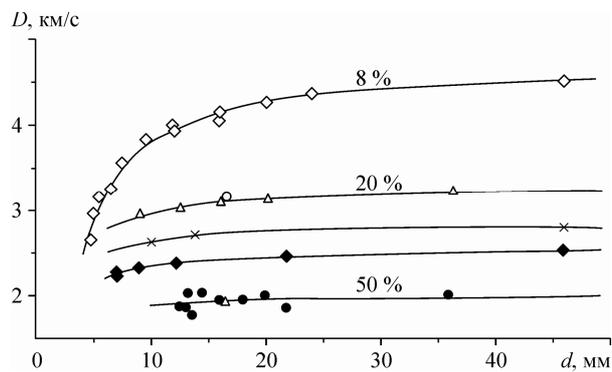


Рис. 32. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда для эмульсионных ВВ (цифры у кривых указывают содержание полых микросфер в составе ВВ).

На экспериментальной станции ускорителя ВЭПП-3 были проведены эксперименты по исследованию с помощью синхротронного излучения (СИ) детонирующих образцов из ТАТБ (1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол, ТУ 75 11903-538-90) и пластифицированного состава на основе ТАТБ (ПСТ, ТУ 75 11903-539-90) диаметром 20 мм. ТАТБ является наиболее перспективным ВВ в ведущих ядерных центрах ввиду его высокой пожаробезопасности. При сильном нагреве ТАТБ разлагается, а не взрывается.

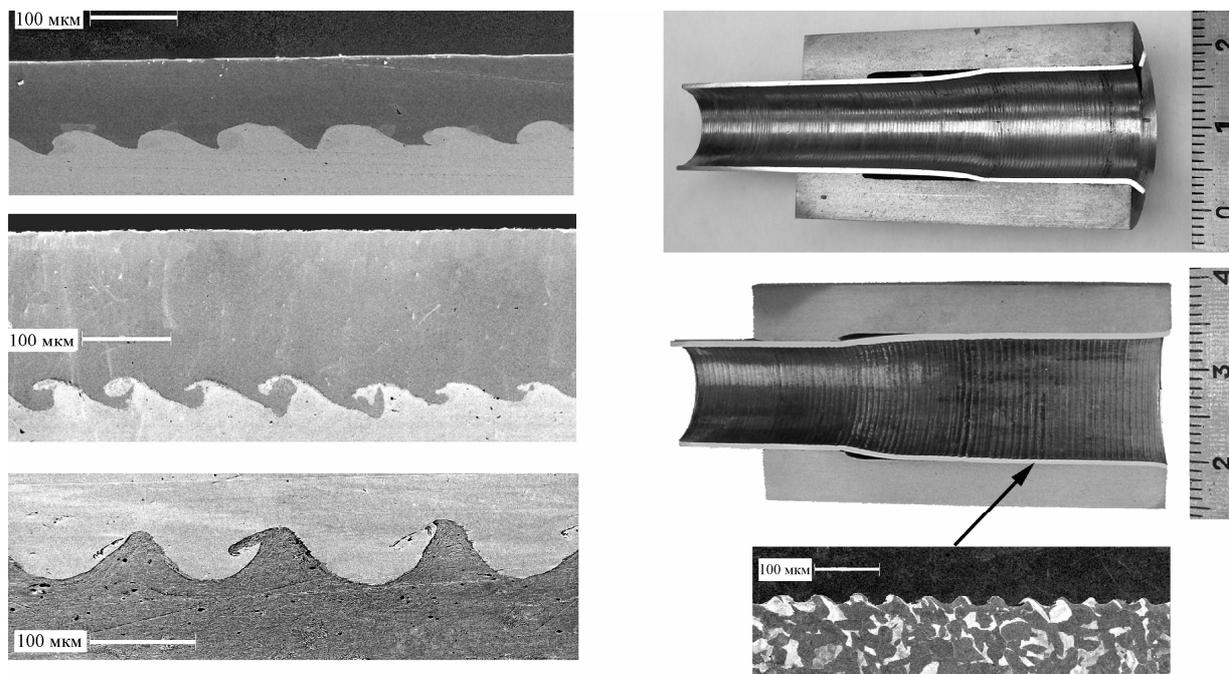


Рис. 33. Примеры использования эмульсионных ВВ для сварки взрывом.

Слева — взрывное плакирование фольгами, сверху вниз: титан 100 мкм/нержавеющая сталь; молибден 200 мкм/сталь; медь 1 мм/сталь. Справа — сварка взрывом металлической трубки со стальной втулкой, сверху вниз: распрессовка; сварка; микрошлиф зоны соединения при сварке.

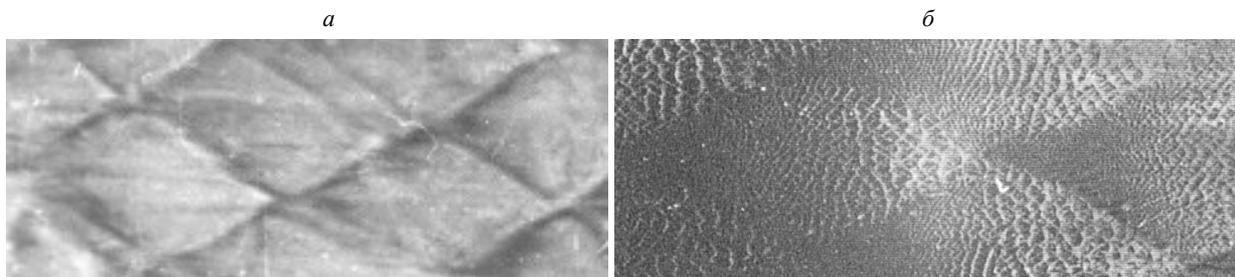


Рис. 34. Классическая (а) и двухразмерная (бифуркационная) (б) структуры на следовых отпечатках многофронтной детонации.

Измерены пространственный профиль плотности на фронте детонации в присоединенной зоне и объемное распределение плотности продуктов взрыва за фронтом детонации. Значения плотности в пике Неймана составляют $\rho_r = 2,68 \text{ г/см}^3$ для ТАТБ при скорости детонации $7,51 \text{ км/с}$ и $\rho_n = 2,65 \text{ г/см}^3$ для ПСТ при скорости детонации $7,38 \text{ км/с}$. Ширина зоны химической реакции в этих ВВ составляет $1\text{—}1,2 \text{ мм}$. Результаты измерения динамики углового распределения сигнала малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) показали, что сразу за фронтом детонации фиксируются наночастицы размером $\sim 1,5\text{—}2 \text{ нм}$, предположительно из графита. У ТАТБ размер частиц слабо растет со временем до $\sim 2,5\text{—}3 \text{ нм}$, а у ПСТ они растут слабее и через 4 мкс достигают размеров $\sim 2\text{—}2,5 \text{ нм}$. Судя по амплитуде сигнала

МУРР, следов нанодiamondов размером более 1 нм при детонации этих ВВ не обнаружено. Если они есть, то их размер не превышает 1 нм .

Получила экспериментальное подтверждение гипотеза о природе двухразмерных ячеистых структур газовой детонации: бифуркационные структуры наблюдаются в многотопливных системах (при определенных условиях), где один из присутствующих топливных компонентов разлагается с экзотермическим эффектом. Такие вещества обеспечивают начальную стадию выделения энергии и развитие неустойчивости непосредственно на головном фронте детонационной волны, перед основной стадией немоного (двухступенчатого) энергосвободения (рис. 34, б) в противовес классической одномерной структуре (рис. 34, а).

Программа 3.5.7. Нестационарные процессы при высоких плотностях энергии в гидродинамике однородных и многофазных сред (структура течений, синтез наноструктурных соединений, волновые процессы) (координатор докт. физ.-мат. наук В. К. Кедринский)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева разработана модель ударно-волновой магнитной кумуляции в металлических порошках, учитывающая (в отличие от известных ранее моделей) сжимаемость и электропроводность вещества за ударным фронтом. Модель основывается на уравнении состояния для высокопористого вещества (типа Оха—Персона), авторских экспериментальных данных о сжимаемости и электропроводности металлических порошков. С использованием компьютерного пакета МАГ выполнено одномерное моделирование магнито-гидродинамических про-

цессов при ударно-волновой магнитной кумуляции. Показано, что существенную роль играет гидродинамическая кумуляция в нарастающем проводящем слое, конечное поле зависит от размеров системы, начального магнитного поля, мощности взрывчатого вещества, сжимаемости и электропроводности рабочего вещества. Поставлены специальные эксперименты в области магнитных полей мегагауссного диапазона для верификации модели (рис. 35).

В квазиодномерной геометрии при использовании высокопористого алюминиевого

порошка ($0,5 \text{ г/см}^3$) зарегистрировано магнитное поле около 4 МГц при коэффициенте усиления поля до 100 раз. Экспериментальная запись магнитного поля в генераторе хорошо согласуется с модельной зависимостью (рис. 36), т. е., несмотря на ряд сделанных допущений, построенная физико-математическая модель ударно-волновой магнитной кумуляции является адекватной. Этот результат открывает возможности оптимизации кумулятивной системы с целью увеличения генерируемых магнитных полей и соответствующих плотностей электромагнитной энергии.

В том же Институте в рамках комбинационной модели гомогенно-гетерогенной нуклеации (случай микрокристаллитов — ядер кавитации) исследована нестационарная задача о динамике состояния вязкого расплава, особенностях структуры волнового поля и развития пограничного слоя на стенке канала (осесимметричная постановка) в начальной стадии формирования потока магмы за фронтом волны декомпрессии. Показано (рис. 37), что в структуре волнового поля выделяется предвестник P , в котором возникают скачки декомпрессии, достаточные для формирования серий дискретных кавитационных зон, зон нуклеации N_b , скачков вязкости и концентрации перед фронтом основной волны декомпрессии.

Этот эффект приводит к «торможению» основной волны, за фронтом которой интенсивно растет вязкость, и усиливает ее градиент в верхней зоне столба магмы. Численный анализ динамики структуры поля массовых скоростей показал, что на стенках вулкана формируется пограничный слой, интенсивное развитие которого создает условия для возникновения эффекта склерозирования канала вулкана (рис. 38), т. е. в верхней зоне разгружаемого волной декомпрессии магматического расплава формируется структура типа «диафрагмы», которая перекрывает значительную часть сечения канала. Очевидно, такая структура пограничного слоя будет способствовать отделению части потока и может служить механизмом, объясняющим одно из таких загадочных явлений — периодичность выбросов, наблюдаемых в процессе взрывных извержений некоторых типов вулканов.

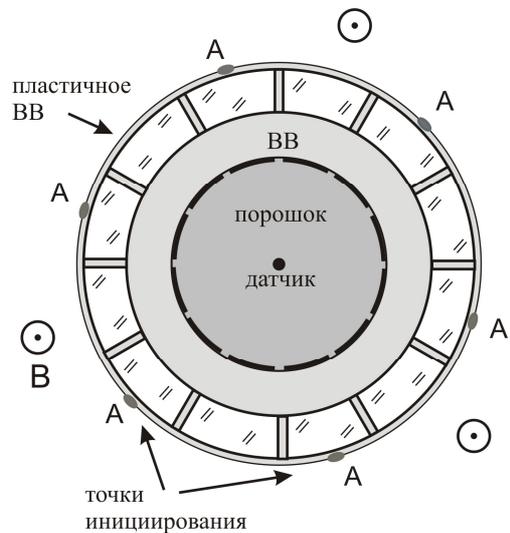


Рис. 35. Схема эксперимента.

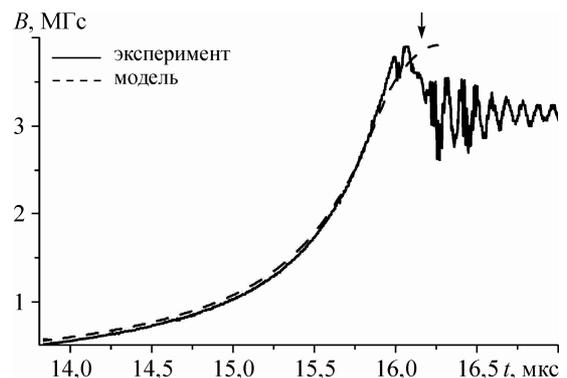


Рис. 36. Сравнение экспериментальной и модельной зависимостей магнитного поля.

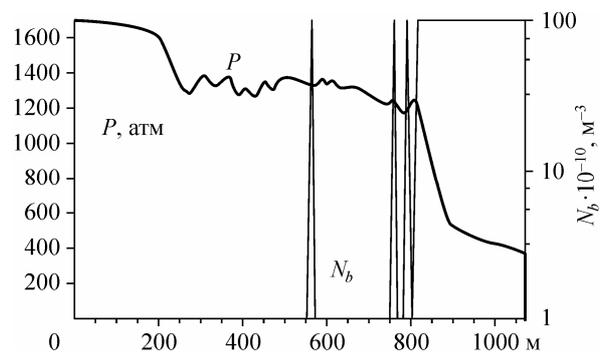


Рис. 37. Волна декомпрессии с предвестником и системой дискретных кавитационных слоев перед фронтом.

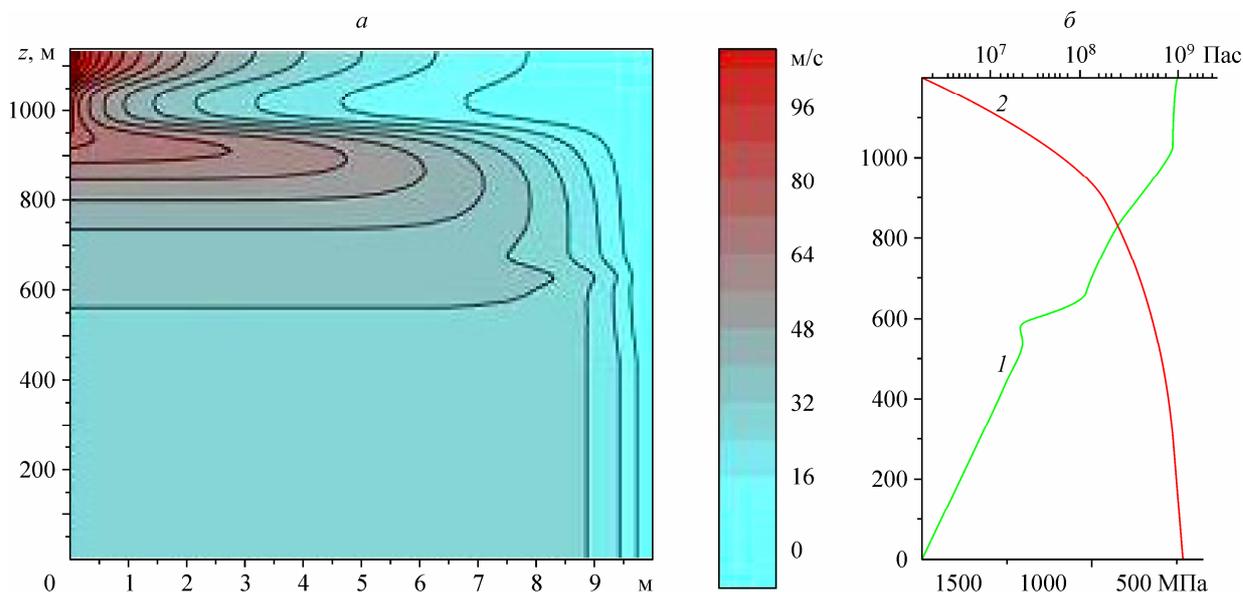


Рис. 38. Распределение давления (а), вязкости и поле вертикальной компоненты массовой скорости (б) в канале вулкана к моменту времени 1,1 с.

Программа 3.5.8. Теплофизические основы плазмохимической конверсии энергетических сред (координатор член-корр. РАН М. Р. Предтеченский)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе разработан двухстадийный способ получения кремния высокой чистоты путем синтеза карбида кремния и восстановления кремния из диоксида карбидом кремния. На первой стадии в плазменном реакторе осуществляется синтез карбида кремния из мелкодисперсного кварцита и пироуглерода. На второй стадии с помощью полученного SiC происходит восстановление кремния из его диоксида. Для реализации предложенной технологии разработаны плазмохимический реактор для синтеза SiC на основе двухструйного плазмотрона (рис. 39) и плазменно-дуговая электропечь с графитовыми электродами для восстановления кремния (рис. 40). Проведены технологические

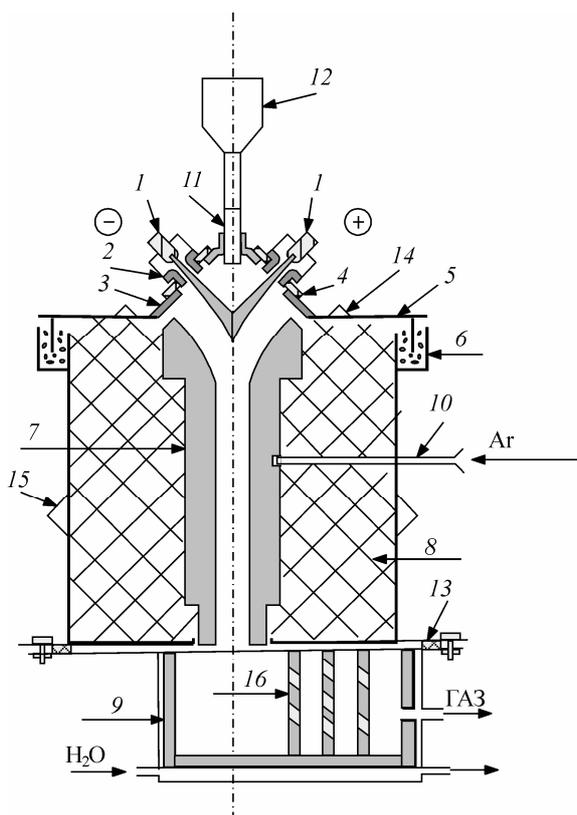


Рис. 39. Схема плазмохимического реактора.

1 — электрод, 2 — сопло, 3 — пирамида, 4 — изолятор, 5 — крышка, 6 — песочный затвор, 7 — графитовый реактор, 8 — футеровка, 9 — холодильник, 10 — вольфрамовая термопара, 11 — водоохлаждаемая трубка подачи порошка, 12 — вибрационный дозатор порошка, 13 — резиновое уплотнение, 14 — водовод охлаждения крышки реактора, 15 — водовод охлаждения боковых стенок реактора, 16 — графитовые пластины сбора мелкодисперсного SiC.

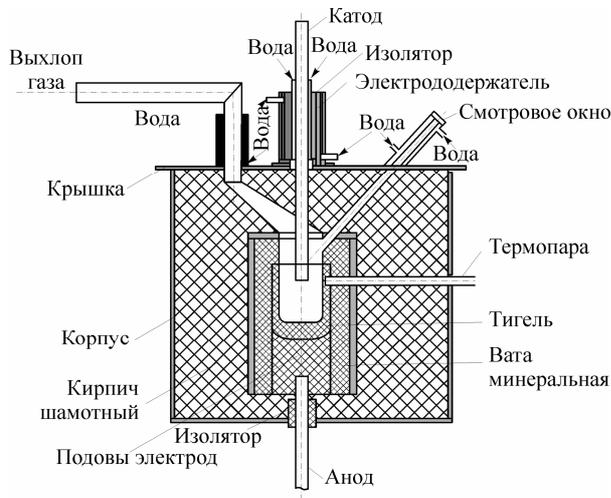


Рис. 40. Плазменно-дуговая печь для восстановления кремния.

испытания созданных плазменных установок и отработаны режимы по оптимизации получения целевых продуктов. Полученный продукт SiC представляет собой наноразмерный материал от 5 до 20 нм (рис. 41).

Одно из основных преимуществ применения электродуговой плазмы для получения солнечного кремния заключается в меньших энергозатратах по сравнению с традиционными

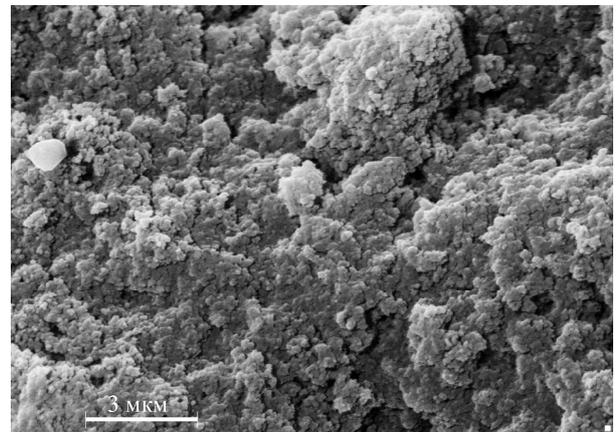


Рис. 41. Фотография полученного карбида кремния.

технологиями. Значимость результатов исследований состоит в возможности промышленной реализации плазменной технологии получения кремния высокой чистоты с использованием чистых компонентов (кварцевый песок, пироуглерод). На основе проведенных исследований в ОАО «СКБ Сибэлектротерм» разработано и изготовлено оборудование для комплексного проведения опытных технологических испытаний на Ульяновском металлургическом заводе (Казахстан).

Программа 3.5.9. Физическая механика газового и плазменного формирования наноразмерных структур (координатор акад. А. К. Ребров)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе развит самосогласованный метод определения заряда пылевых частиц в плазме разрядов низкой плотности с учетом неравновесности электронной компоненты. Определены радиальные распределения плотности захваченных ионов и самосогласованного потенциала вокруг пылевых частиц микронных размеров (рис. 42). Показано, что вокруг отрицательно заряженных пылевых частиц образуется облако захваченных ионов, отстоящее от частицы на расстоянии 0,3—0,5 ионных дебаевских длин. Таким образом, система пылевая частица + облако захваченных ионов представляет собой своеобразный «квазиатом» с отрицательным ядром и положительной оболочкой из захваченных ионов (рис. 43). При низких плотностях газа в пылевой плазме такая система обладает аномально высоким ко-

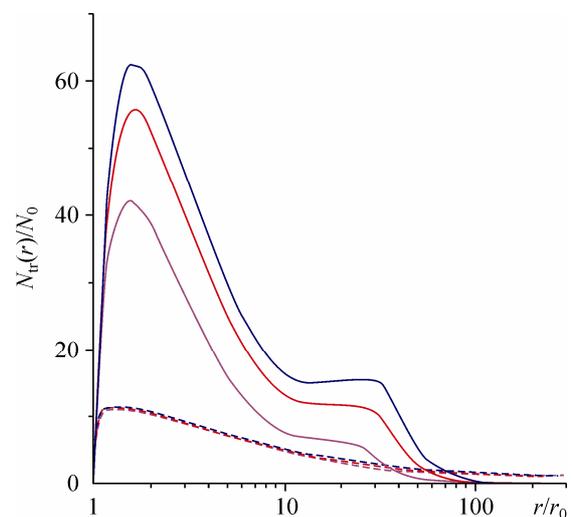


Рис. 42. Радиальное распределение плотности захваченных ионов $N_{ит}(r)$ для различных длин Дебая.

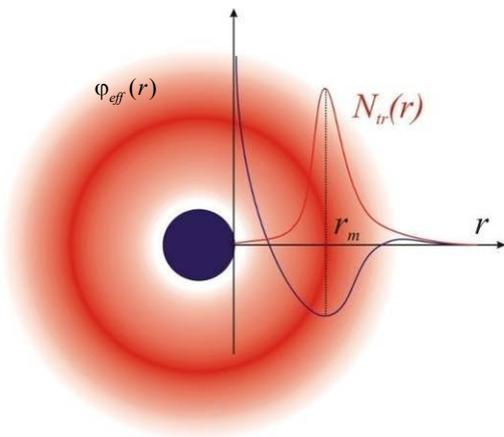


Рис. 43. Схема пылевого квазиатома и коэффициент поляризуемости α_d .

$$\alpha_d \approx \frac{Z_d r_m^3}{Z_d \beta} \sim \lambda_i, \alpha_d \sim (2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3) \gg r_0^3 (\sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3).$$

эффицентом поляризации. Индуцированные пылевые диполи в такой системе могут быть причиной образования цепочечных и многослойных структур в пылевой плазме. Исследовано влияние концентрации пылевых частиц в тлеющем разряде постоянного тока на параметры пылевой плазмы. Показано, что с повышением концентрации пылевых частиц повышается среднее электрическое поле в пылевой плазме, и пылевая плазма обедняется электронной компонентой и увеличивается концентрация отрицательного заряда на пылевых частицах.

В том же Институте выполнены расчеты сорбции, нуклеации и гетерогенной конденсации паров серебра, воды и их смеси по усовершенствованной модели Ленгмюра (рис. 44). Расчеты показали ряд ранее неизвестных явлений: при совместной адсорбции паров серебра и воды присутствие адсорбата серебра существенно стимулирует адсорбцию пара воды; рост насыщения пара воды приводит к зарождению капиллярного конденсата, а не к спонтанной нуклеации, как предсказывают классические теории; присутствие адсорбата воды может привести к радикальной перестройке структуры адсорбата и конденсата серебра; при стационарных потоках паров компонентов на фронт конденсации концентрации компонентов в конденсате меняются по сложному закону, что приводит к нестационарности режимов конденсации. Расчетами также удалось найти режимы, когда на подложке возникают условия роста столбчатых и нитевидных кри-

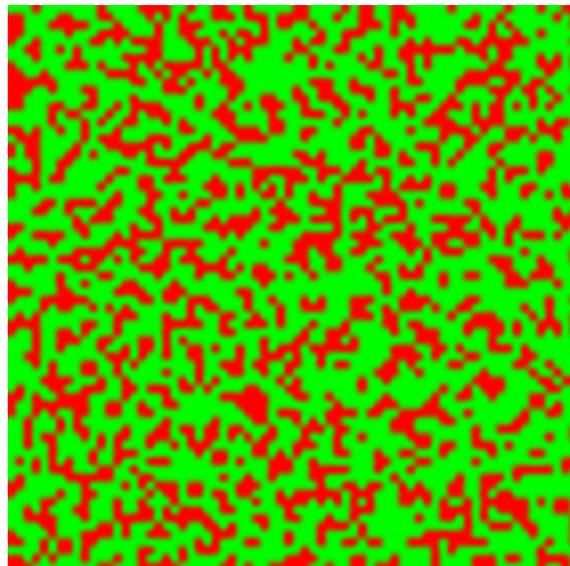


Рис. 44. Участок фронта конденсации $218 \times 218 \text{ \AA}$, 10 %Ag + 90 %H₂O, 120 мкс.

сталлов. Расчеты показали также, что эффективность конденсации и испарения зависит не только от параметров паровой среды и температуры подложки, как принято считать, но и от структуры конденсата на подложке. Неравновесное относительно паровой среды состояние структуры конденсата вызывает существенную нестационарность процессов конденсации и испарения (рис. 45). Показано, что присутствие неконденсирующихся газовых примесей вблизи подложки влияет на скорость массообмена не только вследствие возникновения препятствий для диффузии, что общеизвестно, но также и вследствие изменений состава адсорбата на фронте массообмена. Полученные результаты позволяют совершенствовать технологию получения нанодисперсных материалов.

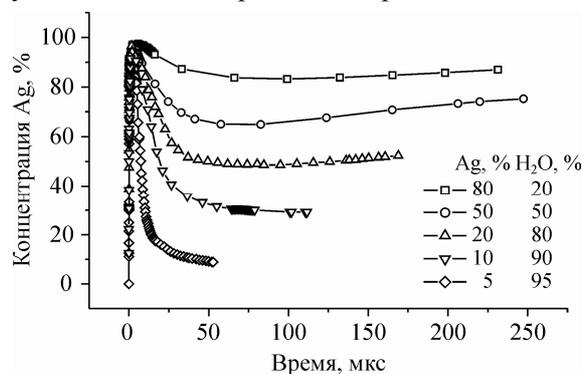


Рис. 45. Динамика концентрации серебра в композите при стационарном режиме подачи паров компонент.