

**ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.19.
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 Ш.19.1. Математические проблемы нелинейных моделей
движения сложных сред (координаторы акад. Л. В. Овсянников,
докт. физ.-мат. наук А. П. Чупахин)**

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева проведено теоретическое и экспериментальное исследование симметричных уединенных волн на границе раздела двухслойной жидкости. На основе математической модели двухслойной мелкой воды, учитывающей влияние нелинейности и дисперсии, построены аналитические и численные решения задачи о распространении внутренних волн большой амплитуды в интрузионных и гравитационных течениях. Экспериментально изучен процесс трансформации уединенных волн над шельфом, и получено соответствие построенных численных и аналитических решений с экспериментальными данными.

В том же Институте методом группового анализа дифференциальных уравнений исследовано трехмерное течение газа в рамках модели стационарного вихря с гравитацией. Решение сводится к исследованию обыкновенного дифференциального уравнения, заданного неявно. Изучены свойства решений этого уравнения, получено описание режимов течения в фазовом пространстве, доказано существова-

ние дозвукового и сверхзвукового режимов движения газа в физическом пространстве. Показано, что классификация типов решений и их качественное поведение аналогичны случаю вихря Овсянникова без гравитации.

В Институте вычислительного моделирования методом численного моделирования проведено исследование задачи о взаимодействии свободной границы жидкого моста с потоком вязкого газа. Выявлены характерные структуры течения в зависимости от скорости и направления потоков газа и температурных режимов. Результаты важны для планирования экспериментов по зонной плавке, где необходимо решать вопросы стабилизации границы раздела.

В том же Институте впервые дан анализ устойчивости нестационарного движения жидкости в двухслойной системе с двумя свободными границами и одной поверхностью раздела.

Дано обобщение задачи Рэлея—Бинара на многокомпонентные смеси с учетом эффектов Соре и Дюфура.

**Программа Ш.19.2. Нелинейные волны и турбулентность в многофазных потоках
(координатор член.-корр. РАН С. В. Алексеенко)**

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе получена информация о волновой структуре ривулетов в широком диапазоне частот для разных чисел Рейнольдса течения при различных значениях краевого угла смачивания. Представлена детальная форма волновых ривулетов для разных режимов течения.

Продемонстрировано общее для всех исследованных случаев свойство нечувствительности поперечных размеров ривулета и краевого угла к волновому движению. Показано, что волновая структура при ривулетном течении существенно различается для случаев малого и большого краевых углов смачивания.

Для малого краевого угла форма регулярных волн имеет качественное сходство с волновой картиной при пленочном течении жидкости. Различие между ривулетным и пленочным течением наблюдается при низких частотах возбуждения, когда на поверхности ривулета наблюдаются волны ступенчатой формы, в то время как для пленочного течения жидкости такие волны являются неустойчивыми. Для большого краевого угла волновая картина принципиально отличается от случая малого угла. Для всех исследованных режимов течения в области существования регулярных волн их форма подобна и имеет отчетливый двугорбый профиль с коротким передним гребнем и длинным задним (рис. 23).

В том же Институте на основе развитой ранее асимптотической теории турбулентного газодисперсного течения в каналах в пределе больших чисел Рейнольдса и дифференциальной модели переноса напряжений Рейнольдса дисперсной фазы получено решение задачи об осаждении частиц.

Согласно результатам асимптотического анализа для частиц с параметром инерционности $\tau_+ < 0,03R_+$, где $R_+ = v_\tau R / \nu$ — число Рейнольдса, построенное по динамической скорости τ_+ и радиусу канала, влияние инерции частиц сосредоточено в пристенной области, в то время как во внешней области потока скорость частиц практически совпадает со скоростью несущей фазы, причем для распределения концентрации частиц во внешней области справедлив логарифмический закон. Задача нахождения скорости осаждения частиц сводится к нахождению аддитивного коэффициента в логарифмическом законе из решения одномерной

задачи динамики частиц в вязком подслое. Численное решение такой задачи показало наличие бифуркации решения докритического типа, соответствующей резкой границе между диффузионно-импактным и инерционным режимами осаждения. Диффузионно-импактный режим характеризуется определяемыми броуновской диффузией малыми квазиравновесными величинами нормальных напряжений Рейнольдса частиц на стенке и малыми скоростями осаждения и наблюдается при значениях параметра инерционности τ_+ , меньших критического значения τ_{cr2} , величина которого зависит от числа Шмидта броуновской диффузии Sc_B . Инерционный режим отличается заметными величинами нормальных напряжений Рейнольдса частиц на стенке и существенно большими скоростями осаждения и наблюдается при $\tau_+ > \tau_{cr1}$, где τ_{cr1} не зависит от Sc_B . В диапазоне $\tau_{cr1} < \tau_+ < \tau_{cr2}$ имеет место гистерезис решения в зависимости от начальных данных расчета (рис. 24, а). Наличие бифуркации существенно влияет на характер аккумуляции частиц в вязком подслое, которая резко выражена в диффузионно-импактном режиме, и гораздо слабее — в инерционном (рис. 24, б). Наличие бифуркации и неоднозначности в решении уравнений дифференциальной модели вторых моментов скорости пульсаций частиц выявляют недостаток использованной модели замыкания уравнения переноса вторых моментов.

Предложены простые аналитические аппроксимации полученного численного решения для скорости осаждения частиц в каналах и трубах. Получены пристеночные функции для концентрации частиц, позволяющие кор-

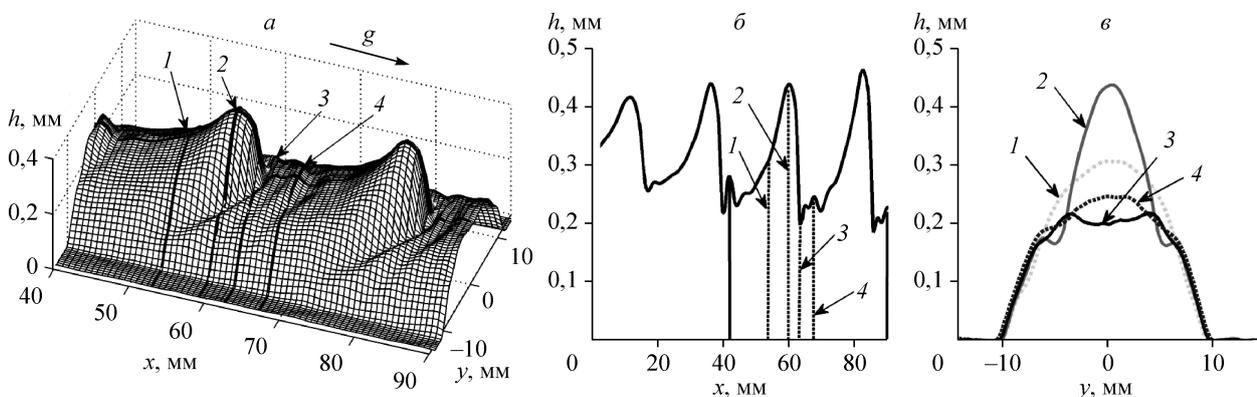


Рис. 23. Трехмерная форма регулярной волны с развитым капиллярным предвестником (а), продольный (б) и поперечный (в) профили в различных сечениях (1—4).

Краевой угол смачивания $\alpha = 6^\circ$, расход жидкости $Q = 1,25$ мл/с, $Re = 36$, частота возбуждения $F = 23$ Гц.

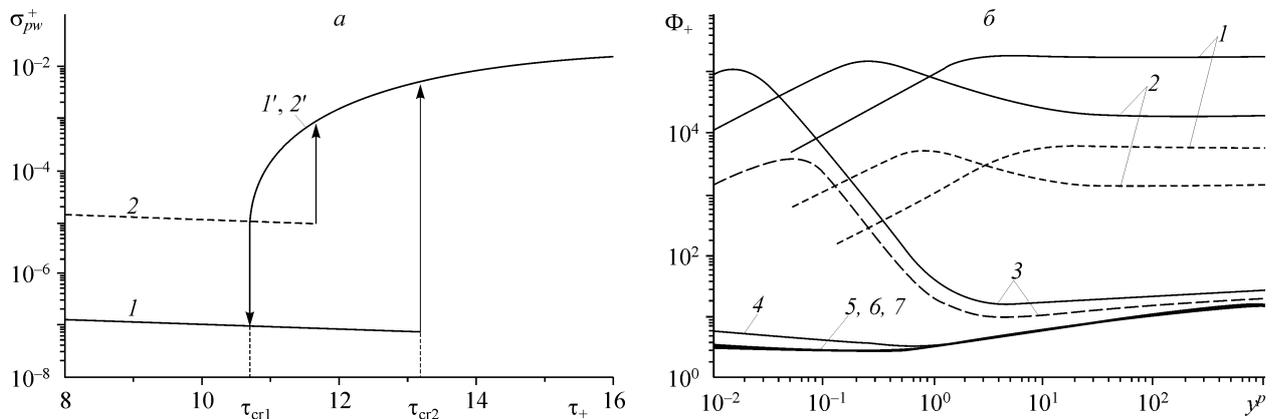


Рис. 24. Зависимость нормального напряжения Рейнольдса σ_{pw}^+ частиц на стенке от параметра инерционности τ_+ .

1, 1' — $Sc_B = 10^4$; 2, 2' — $Sc_B = 10^6$ (Sc_B — число Шмидта) (а). Зависимость концентрации частиц Φ_+ от безразмерного расстояния от стенки $y_p = y_+/\tau_+$: 1 — $\tau_+ = 0,1$; 2 — 1; 3 — 10; 4 — 25; 5 — 100; 6 — 500, 7 — логарифмический закон для $\tau_+ \rightarrow \infty$. Сплошная линия — $Sc_B = 10^6$, штриховая линия — $Sc_B = 10^4$ (б).

ректно моделировать задачу осаждения инерционных частиц с параметром инерционности $\tau_+ < 0,03R_+$ с помощью равновесных эйлеровых

моделей, широко распространенных в современных CFD-кодах.

Программа Ш.19.3. Гидродинамика процессов в природных системах и технических устройствах: теоретическое, экспериментальное и численное моделирование (координатор член-корр. РАН В. В. Пухначев)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева экспериментально показано, что при многократном отражении нелинейных волн от

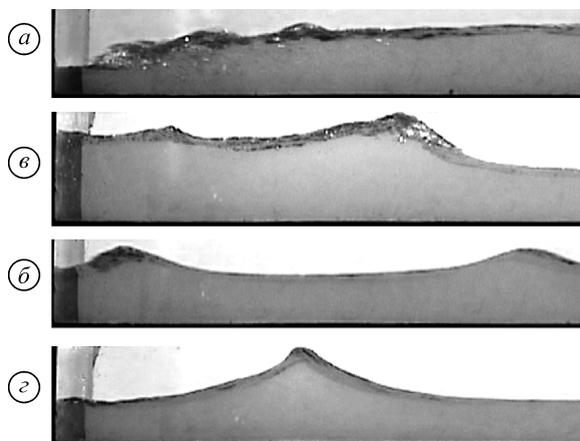


Рис. 25. Мгновенные картины набегающих и отраженных волн: а — набегающая волна распространяется влево, б — волна после первого отражения от вертикальной стенки (распространяется вправо), в — третье отражение волны, г — волна распространяется вправо.

торцевых стенок канала ограниченной длины в спектре колебаний глубины воды во времени в фиксированных точках пространства выделяются собственные частоты сейшевых колебаний. Показано, что при каждом отражении увеличивается число ондуляций и что из-за ондуляций глубина под первым гребнем отраженной волны в 1,1—1,3 раза превышает начальную глубину верхнего бьефа. Видеосъемка показала (рис. 25), что профиль свободной поверхности при суперпозиции встречных бегущих волн имеет вид, характерный для стоячих волн, но в течение ограниченного интервала времени и на ограниченном участке длины канала.

В том же Институте изучены эффективно одномерные задачи о движении сред Максвелла и Кельвина—Фойхта, такие как задача о заполнении сферической полости и задача о движении среды в зазоре между вращающимися цилиндрами. Обнаружена аналогия между слоистыми движениями несжимаемой среды Максвелла и одномерными течениями идеального газа с невыпуклым уравнением состояния. Найдена аналогия между распространени-

ем волн сдвига в среде Кельвина—Фойхта и акустических волн в динамике вязкого газа.

С помощью теории двух- и трехмасштабной гомогенизации выведены и обоснованы макроуравнения Максвелла для влагонасыщенных пористых сред. Обнаружено явление частотной дисперсии электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. Впервые теоретически вычислен показатель цементации и предел перколяции в эмпирическом законе Арчи, применяемом в геофизике для определения эффективной электрической проводимости по пористости и электрической проводимости насыщающего флюида.

Программа Ш.19.4. Аэротермодинамика высокоскоростных летательных аппаратов (координатор докт. физ.-мат. наук А. Н. Шиплюк)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича предложен критерий ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового пограничного слоя, основанный на отношении амплитуды гармоник к амплитуде основной частоты. Данный критерий может использоваться в расчетах числа Рейнольдса перехода и положения перехода в зависимости от начальной амплитуды основной волны, а также в управлении течением в пограничных слоях высокоскоростных летательных аппаратов.

В исследованиях обтекания треугольного крыла с затупленной передней кромкой при числе Маха $M = 4$ обнаружены аномально высокие уровни пульсаций массового расхода в области боковой кромки, вызванные взаимодействием головной ударной волны с пограничным слоем на линии растекания. Максимальные их значения внутри слоя достигают 20 %. Основная часть энергии сосредоточена в области низких (до 3 кГц) частот. Такое явление может вызывать дополнительную неблагоприятную нагрузку на несущую поверхность крыла по теплу и вибрациям.

Выполнено прямое численное моделирование процессов линейного и нелинейного развития возмущений в сверхзвуковых и гиперзвуковых пограничных слоях. Изучены особенности развития неустойчивости, вызванной возмущениями различных мод, в частности исследована неустойчивость гиперзвукового пограничного слоя, связанная с вихревой мо-

Из анализа результатов сейсмического мониторинга аварии на Саяно-Шушенской ГЭС следует, что высокий уровень вибраций ее турбин связан с влиянием сжимаемости воды. Показано, что в гидротурбинах, проточная часть которых достаточно длинна, могут иметь место низкочастотные резонансные гидроакустические колебания воды, а на форсированных режимах их эксплуатации, по аналогии с возникновением срывного флаттера, может иметь место неустойчивость собственных гидроакустических колебаний, что позволяет найти область устойчивых режимов работы конкретной гидротурбины.

дой. Результаты прямого численного моделирования хорошо описывают область неустойчивости.

Методом прямого статистического моделирования Монте-Карло впервые проведено численное исследование распространения детонационной волны в микроканале, заполненном водородно-кислородной смесью. Все химические процессы в данном исследовании моделировались на уровне молекулярных столкновений. В расчетах была получена самоподдерживающаяся детонационная волна, распро-

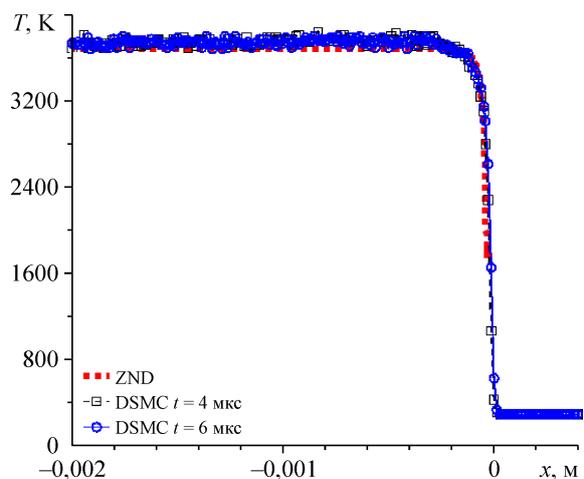


Рис. 26. Сравнение результатов PCM расчетов с результатами, полученными на основе теории Зельдовича—Неймана—Деринга (ZND) в системе координат, связанной с центром волны (T — поступательная температура).

страняющаяся со скоростью Чепмена—Жуге. Проведено сравнение профилей параметров в системе координат, связанной с фронтом волны, с решением для структуры детонационной волны, рассчитанным на основе теории Зельдовича—Неймана—Деринга ZND. Результаты статистического моделирования находятся в качественном согласии с ZND-теорией (рис. 26). Количественные различия внутри фронта волны связаны с влиянием термической неравномерности, а также процессов переноса (вяз-

кости, теплопроводности и диффузии), которое не учитывается в ZND-теории.

Показано, что применение шевронов на срезе сверхзвуковых сопел приводит к трансформации ударно-волновой структуры струи и генерации крупномасштабных продольных вихрей грибовидной формы, благодаря чему интенсифицируется процесс смешения, снижается общий уровень шума струи и подавляются дискретные составляющие в спектре шума струи.

Программа III.19.5. Физические проблемы управления газодинамическими течениями (координатор докт. физ.-мат. наук А. А. Маслов)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича впервые экспериментально продемонстрирована возможность значительного снижения волнового сопротивления затупленных тел в сверхзвуковом потоке ($M_\infty = 5$ и 20) с помощью плоских сетчатых экранов и газопроницаемых пористых вставок. За плоским сетчатым экраном в сверхзвуковом потоке формируется течение в виде слабо недорасширенной струи с дефектом числа Маха на ее оси. В результате на рас-

положенном за экраном торце цилиндра возникает вытянутая вперед отрывная зона и цилиндр обтекает как заостренное тело. Этот эффект приводит к снижению общего сопротивления модели сетчатый экран—цилиндр. Цилиндр с газопроницаемой передней пористой вставкой обтекает сверхзвуковым потоком как заостренное тело из-за разницы гидравлического сопротивления приосевых и периферийных областей газопроницаемой пористой вставки, что и приводит к снижению сопротивления (рис. 27).

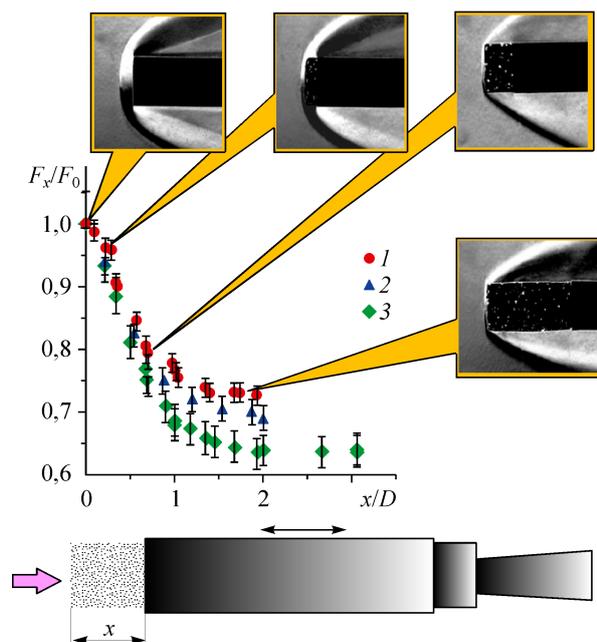


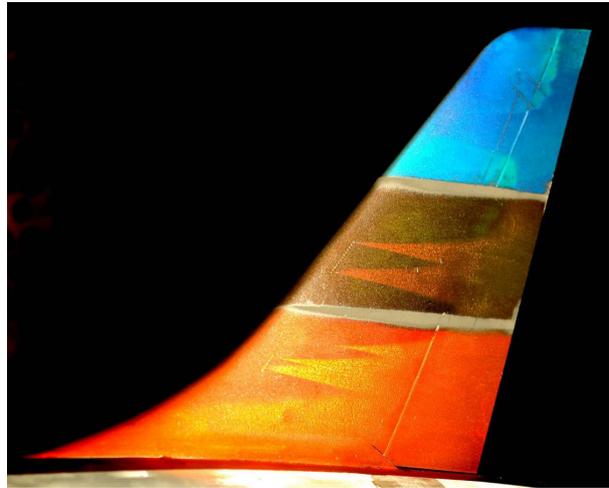
Рис. 27. Модель, визуализации обтекания и зависимости относительной силы сопротивления для газопроницаемой вставки пористостью 95 %. Диаметр пор 1 (1), 2 (2), 3 мм (3).

Показана восприимчивость дозвуковой круглой мини- и микроструи к поперечному акустическому полю. Объяснен механизм такого воздействия, заключающийся в уплощении струи под воздействием акустического поля и последующей неустойчивости такой струи, связанной с ее синусоидальным колебанием и последующим раздвоением. Данный эффект реализуется как при низкой, так и высокой частоте акустического воздействия (от 100 до 1500 Гц) и независимо от диаметра сопла (200, 400, 500 мкм).

Разработаны диагностические жидкокристаллические (ЖК) составы, чувствительные к касательным напряжениям, но слабо чувствительные к температуре. Созданы оптическая схема регистрации отклика пленки ЖК на сдвиг и стенд для получения калибровочной зависимости «цвет—величина—направление вектора касательного напряжения». ЖК-смеси использованы совместно с ЦАГИ для тестовых испытаний и визуализации распределения касательных напряжений на вертикальном оперении модели (с турбулизаторами), обтекаемой

Рис. 28. Пример визуализации разных диапазонов касательных напряжений с помощью трех нечувствительных к температуре ЖК с разными рабочими диапазонами температур. $M = 0,2$.

дозвуковым потоком в трансзвуковой АТ-128 ЦАГИ. При увеличении уровня сдвиговых напряжений цвет ЖК претерпевает сдвиг в голубую часть видимого спектра (рис. 28). Разработанные диагностические ЖК-составы могут найти широкое применение при изучении особенностей течения на моделях (ламинарно-турбулентный переход, отрыв—присоединение и др.) при панорамных измерениях в промышленных установках и тестировании численных методов.



Программа Ш.19.6. Детонационные и ударно-волновые процессы в газовых, гетерогенных и конденсированных средах и управление ими для создания новых технологий (координатор акад. В. М. Титов)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева в вихревой плоскорадиальной камере диаметром 204 мм впервые реализованы и исследованы непрерывная спиновая и радиальная пульсирующая детонации смеси мелкодисперсного активированного древесного угля (2—20 мкм) и воздуха с добавкой водорода, менее 5 % к расходу угля и 1 % к расходу воздуха (рис. 29). В камере диаметром 500 мм выявлено влияние масштабного эффекта: реализована непрерывная спиновая детонация при подмешивании водорода к углю до 2,8 % (по отношению к воздуху — менее 0,65 %), организован процесс детонационного сжигания более крупных (около 60 мкм) частиц угля; при этом обнаружено увеличение числа детонационных волн.

Проведен сравнительный термодинамический анализ детонационной способности смесей: н-гептан—воздух—перекись водорода, изооктан—воздух—перекись водорода в широком диапазоне изменения начальных параметров (давления, температуры, концентрации топливного компонента и его фазового состояния), типичных для работы пульсирующего детонационного двигателя и двигателя на вращающейся детонации (перспективные модели для авиационной и ракетно-космической отрасли). Установлено, что добавки перекиси

водорода заметно снижают критические энергии инициирования детонации.

Дано термодинамическое обоснование для использования перспективных смесевых топлив, содержащих компоненты с существенно различающейся детонационной способностью. Топливная система н-гептан—изооктан—перекись водорода—воздух оказывается значительно более чувствительной к детонации, чем традиционное углеводородное топливо. Подобное трехкомпонентное топливо может служить прототипом эффективной топливной системы для перспективного двигателя с пульсирующим детонационным сжиганием

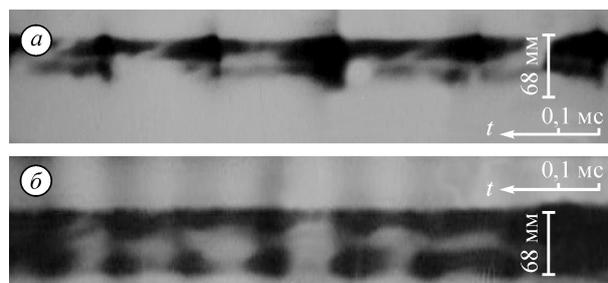


Рис. 29. Фоторегистрограммы детонации угольно-воздушной смеси в камере $d_{c1} = 204$ мм: *a* — непрерывная спиновая детонация, *б* — пульсирующая детонация с радиальными волнами.

топливно-воздушной смеси. Более того, один из компонентов (н-гептан или изооктан) может быть исключен без заметного ущерба для детонационных параметров.

Методом электропроводности исследованы зоны реакции в трех взрывчатых веществах: тэне, гексогене и октогене штатной дисперсности (сотни мкм) и мелкодисперсных (десятки мкм). Продемонстрировано примерно

двукратное ускорение реакции при высокой дисперсности. Наблюдались весьма узкие проводящие зоны за фронтом детонации (менее 0,2 мм). Это меньше, чем в тех же ВВ, прессованных до максимальной плотности. Результаты показывают, что при низких плотностях реакция идет преимущественно по механизму горячих точек, концентрация которых определяется начальной структурой вещества.

**Программа Ш.19.7. Гидродинамика высокоскоростных нестационарных процессов в однородных, многокомпонентных и многофазных средах (динамика состояний, фазовые и структурные изменения при высоких плотностях энергии)
(координатор докт. физ.-мат. наук В. К. Кедринский)**

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева экспериментально показано, что в кумулятивных течениях возможно разложение соединений-предшественников, из которых была изготовлена кумулятивная облицовка, с последующим синтезом новых соединений, отличных от первоначальных. Это открывает возможность получения новых данных о поведении элементов и соединений при динамических нагрузках в диапазонах давлений и температур, значительно более широких, чем при других динамических способах нагружения.

В том же Институте проведена цифровая рентгеновская регистрация процесса кумуляции с использованием метода суммирования изображений с двухслойного регистратора на основе Image Plate, позволившая улучшить отношение сигнал/шум на изображениях. По по-

лученным из цифровых изображений данным проведены количественные измерения сечений кумулятивных струй. Применение двухслойного регистратора позволило улучшить отношение сигнал/шум на изображениях в 1,5 раза и получить за одну вспышку изображения в двух разных спектральных диапазонах (рис. 30). Таким образом показана эффективность методики цифровой рентгеновской регистрации кумулятивных струй и кавитационных процессов в тракте регистрации ПИР-200 — люминофор с памятью на основе ВаFBr : Eu. Следует отметить, что люминофоры обладают рядом преимуществ по сравнению с цифровой обработкой рентгеновской пленки, в 30 раз дешевле цифровых матричных полупроводниковых регистраторов при одинаковой площади регистрации, позволяют получить предельную

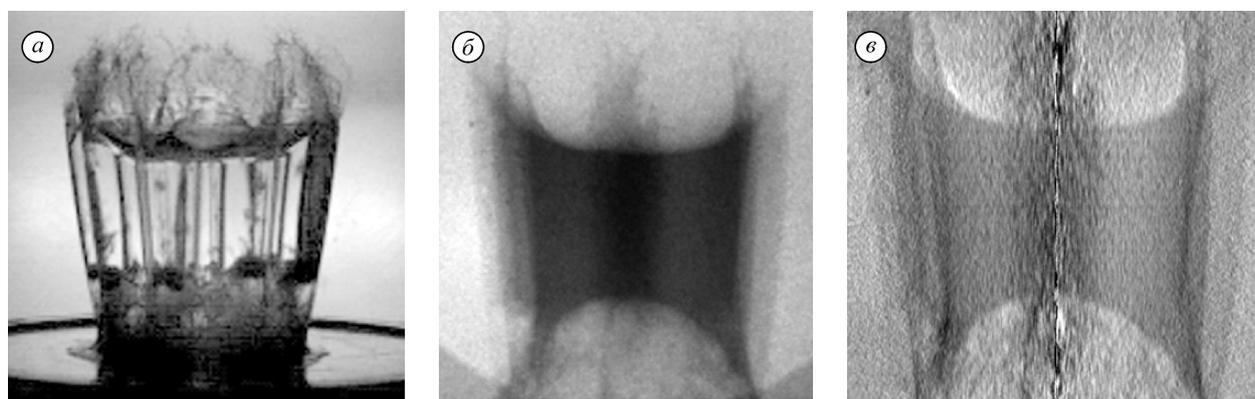


Рис. 30. Снимок кавитационного кластера, наблюдаемого в волне разгрузки вблизи дна в сосуде с водой: *a* — оптический снимок, *б* — рентгеновский цифровой снимок, полученный на люминофоре с памятью на основе ВаFBr : Eu, *в* — рентгеновский снимок, обработанный преобразованием Абеля.

квантовую эффективность, близкую к 100 %, при наборе в пакет и сложении изображений с многослойного детектора.

Экспериментально показано, что при удалении торнадоподобным вихрем из замкнутой камеры мелкодисперсного аэрозоля, создаваемого локальным источником, происходит локализация аэрозоля внутри ядра, при этом его концентрация в ядре примерно на два порядка больше, чем вне него (рис. 31, слева). При удалении аэрозоля без закрутки потока, т. е. без образования вихря, локализации загрязнения не происходит и удаляемый аэрозоль распространяется на значительную часть всей камеры (рис. 31, справа).

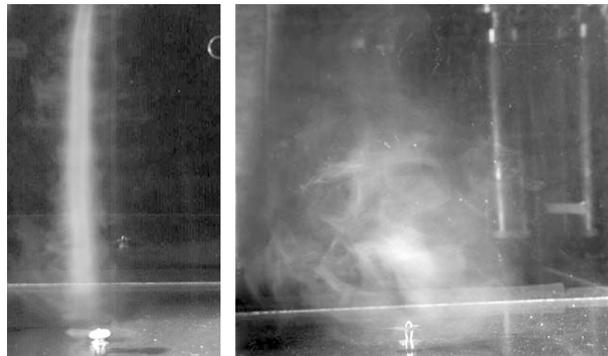


Рис. 31. Удаление аэрозоля с образованием вихря (слева) и без его образования (справа).

Программа Ш.19.8. Плазмо- и электрохимические методы переработки углеводородного и минерального сырья (координатор член-корр. РАН М. Р. Предтеченский)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаедадзе выполнено экспериментальное и теоретическое исследование импульсной лазерной абляции ряда бинарных полупроводников (InP, ZnO, CdTe). Установлены механизмы абляции в зависимости от длины волны и интенсивности излучения. Найдено, что ZnO испаряется конгруэнтно в широком диапазоне условий облучения, тогда как при абляции InP и CdTe

поверхность мишени обогащается по индию и теллуру соответственно. Разработана модель лазерной абляции многокомпонентных материалов с учетом неконгруэнтного испарения и интердиффузии компонентов. Расчеты по модели хорошо согласуются с экспериментальными данными для интенсивностей излучения выше порога плавления мишеней. При низких интенсивностях обнаружена эффективная эмис-

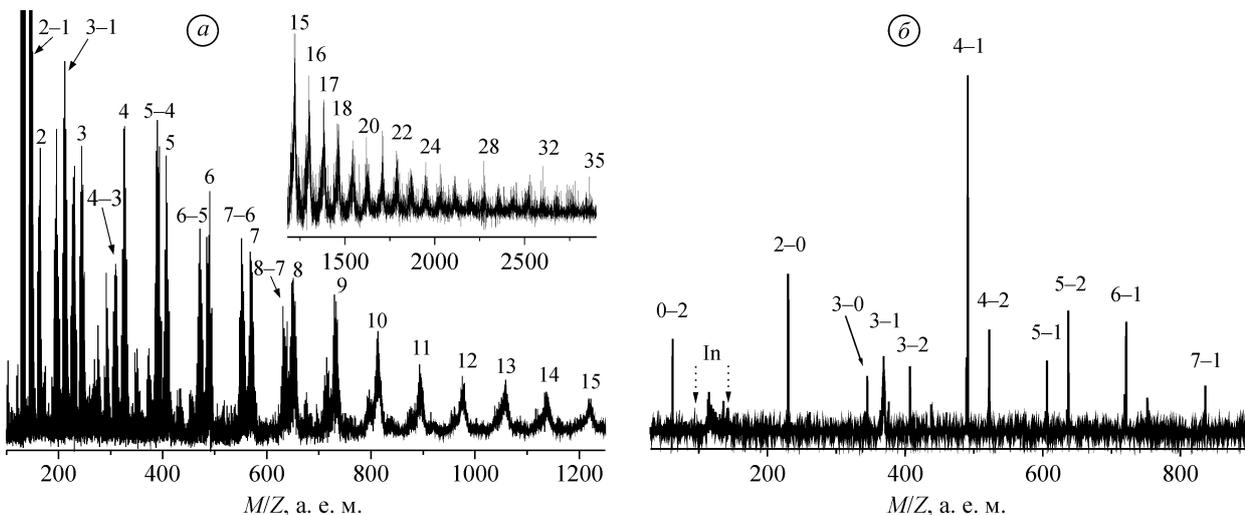


Рис. 32. Типичные масс-спектры кластеров в продуктах абляции оксида цинка (а) и фосфида индия (б) лазерными импульсами ИК-излучения (1064 нм, 9 нс). Пары цифр $n - m$ над пиками обозначают число атомов Zn и O (а) или In и P (б) в кластере. Одиночные цифры над пиками на рис. 32, а соответствуют числу атомов n в стехиометрических кластерах $(ZnO)_n$.

сия частиц с поверхности, для описания которой развита модель нетеплового испарения. Для случая неконгруэнтной абляции обнаружен эффект задержанного испарения. Выявлены условия и механизмы формирования кластеров различной стехиометрии в продуктах лазерной абляции бинарных полупроводников. Методом масс-спектрометрии получены данные о размере и составе кластеров в лазерной плазме, об их относительной стабильности, реакционной способности и фрагментации. Показано, что разный характер абляции полупро-

водников определяет состав формирующихся наноструктур. Так, кластеры оксида цинка являются преимущественно стехиометрическими (рис. 32, *a*), тогда как частицы In_nP_m существенно обогащены по индию (рис. 32, *б*). Результаты работы закладывают научные основы лазерного синтеза многокомпонентных наноструктур с заданными свойствами. Полученные данные о свойствах кластеров бинарных полупроводников важны для таких областей их применения как катализ, оптоэлектроника, солнечная энергетика, медицина.

Программа Ш.19.9. Неравновесные процессы в потоках разреженного газа и плазмы при синтезе наноструктур (координатор акад. А. К. Ребров)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаева исследованы возможности синтеза наночастиц карбида вольфрама в плазмохимическом реакторе на основе электрической дуги постоянного тока в среде инертного газа. Ком-

позитный графит— WO_3 -анод распылялся в электрической дуге в гелии при давлении 25 Торр. Продукты распыления представляют собой частицы, содержащие вольфрам нанометрового диапазона размеров. Синтезирован-

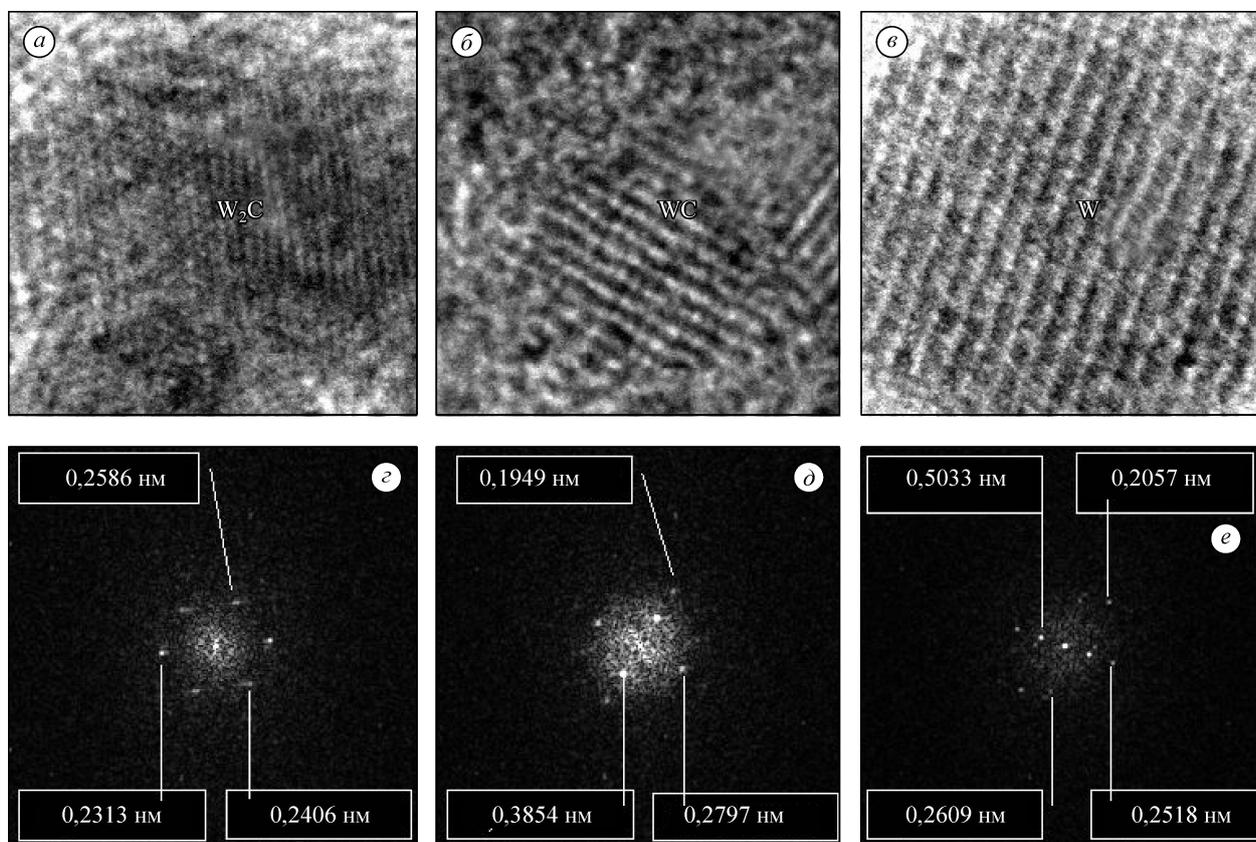


Рис. 33. Изображения нанокристаллов в просвечивающем электронном микроскопе при большом увеличении (*a—в*) и фурье-образы изображений кристаллических решеток (*z—e*).

ный материал исследован с применением электронной просвечивающей микроскопии высокого разрешения. Измерена функция распределения частиц по размерам (средний размер наночастиц составляет около 5 нм). На основе анализа межплоскостных расстояний наночастиц показано, что в продуктах синтеза содержатся: W, WC, W₂C (рис. 33). Результаты измерений показали, что около 25 % синтезированных частиц представляют собой наночастицы карбида вольфрама.

В том же Институте экспериментально и численно исследовано влияние экрана, устанавливаемого на выходную часть сверхзвукового сопла, на величину обратного потока. Интенсивность обратного потока оценивалась по величине измеренного полного давления, а моделирование течения проводилось с помощью различных подходов для разных областей течения: а) в рамках параболизированных уравнений Навье—Стокса (PNS-алгоритм) — течение внутри сопла, а также в периферийной области, б) в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье—Стокса (NS-алгоритм) — течение внутри экрана, в) методом прямого статистического моделирования (DSMC) — течение в периферийной области. Относительный обратный поток определялся как отношение расхода в область углов $\theta > 90^\circ$ с экраном к таковому без экрана. Измеренные и рассчитанные значения относительного обратного потока для различных углов α (различных длин экрана) сравниваются на рис. 34. Видно, что экспериментальные и численные данные находятся в качественном согласии.

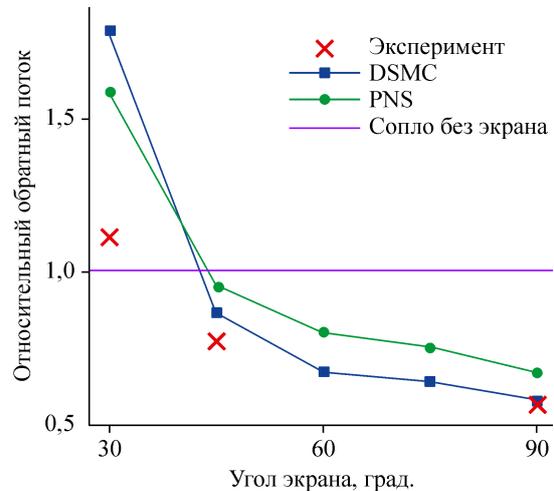


Рис. 34. Влияние длины экрана на величину обратного потока.

Основной результат — в исследованном диапазоне параметров экрана его влияние неоднозначно: при $\alpha > 35^\circ$ наличие экрана приводит к уменьшению обратного потока по сравнению со случаем сопла без экрана, а при $\alpha < 35^\circ$ — к увеличению. Последнее может быть вызвано нарастанием пограничного слоя в длинном экране.

Результаты важны для уменьшения обратных (загрязняющих) потоков от двигателей управления космических аппаратов, включая МКС, а также в различных высоковакуумных струйных технологиях.