

### 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

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева проинтегрированы уравнения газовой динамики, описывающие движения газа с выделенным направлением, в то время как в плоскости, перпендикулярной ему, реализуется инерционное движение газа. Доказано, что уравнения газовой динамики на таком решении интегрируются почти полностью: они сводятся к одному неявному обыкновенному дифференциальному уравнению и конечным формулам, задающим решение в неявном виде.

В том же Институте рассмотрены теоретико-групповые решения уравнения Шредингера с кубической нелинейностью (НУШ), порожденные алгебрами симметрии размерности три. Доказано, что они порождают 27 существенно различных подмоделей НУШ.

Исследованы простые стационарные волны в модели мелкой воды на вращающейся сфере, для которых все искомые функции зависят лишь от широты. Полученные результаты являются первыми в теории мелкой воды на сфере в целом. Они описывают, в частности, движения воздушных масс с полярных шапок планеты и могут моделировать другие крупномасштабные движения в атмосфере и океане (рис. 15).

Выведена новая модель теории длинных волн, описывающая вихревые течения со свободной границей. В одномерном случае модель совпадает с уравнениями неизэнтропической газовой динамики, а в многомерном случае существенно отличается от модели движения газа. Установлено, что уравнения имеют гиперболический тип, и найдены скорости распространения возмущений (рис. 16).

Установлена разрешимость задачи о трехмерных стационарных течениях вязкого баротропного газа в ограниченной области под действием заданных непрерывных полей массовых и объемных сил. Существование обобщенного решения доказано для всех показателей адиабаты, больших  $4/3$ , что позволило рас-

пространить существующую теорию на случай одноатомных газов.

Доказано существование точных решений стационарных уравнений Эйлера, описывающих уединенные волны типа плато в стратифицированной жидкости. Половина такой симметричной волны имеет форму, близкую к профилю плавного бора (рис. 17).



Рис. 15. Линии тока в двух циркуляционных ячейках на сфере.

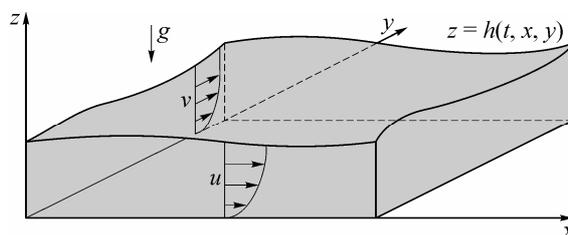


Рис. 16. Движения мелкой воды со сдвигом скорости.

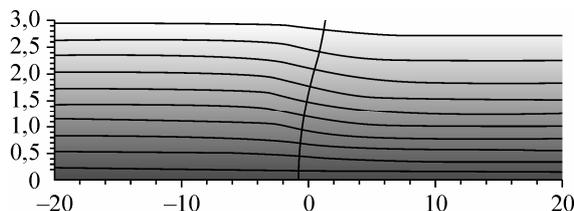
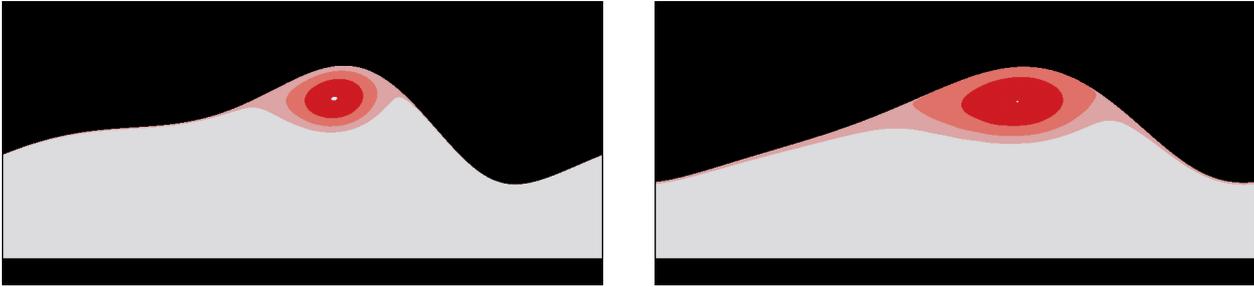


Рис. 17. Плавный бор (фронт).



**Рис. 18.** Волны одинаковой амплитуды, имеющие разные форму и фазовую скорость.

В Институте вычислительного моделирования исследована конвективная устойчивость равновесия в системе двух несмешивающихся слабо сжимаемых жидкостей с общей границей раздела. Изучено влияние объемных источников тепла, возникающих за счет солнечной радиации, и интенсивности теплообмена на свободной поверхности на устойчивость системы.

Проведено численное исследование стационарных нелинейных волн на поверхности жидкой пленки, движимой потоком газа в ми-

никанале. Изучалось влияние высоты канала (относительно толщины пленки) и физических свойств пары газ/жидкость на параметры волн (рис. 18).

Предложены оригинальные математические модели для исследования сезонных изменений вертикальных распределений температуры и солёности в стратифицированных озерах. Разработаны численная модель и компьютерная программа для прогноза динамики вертикальной структуры стратифицированного водоема.

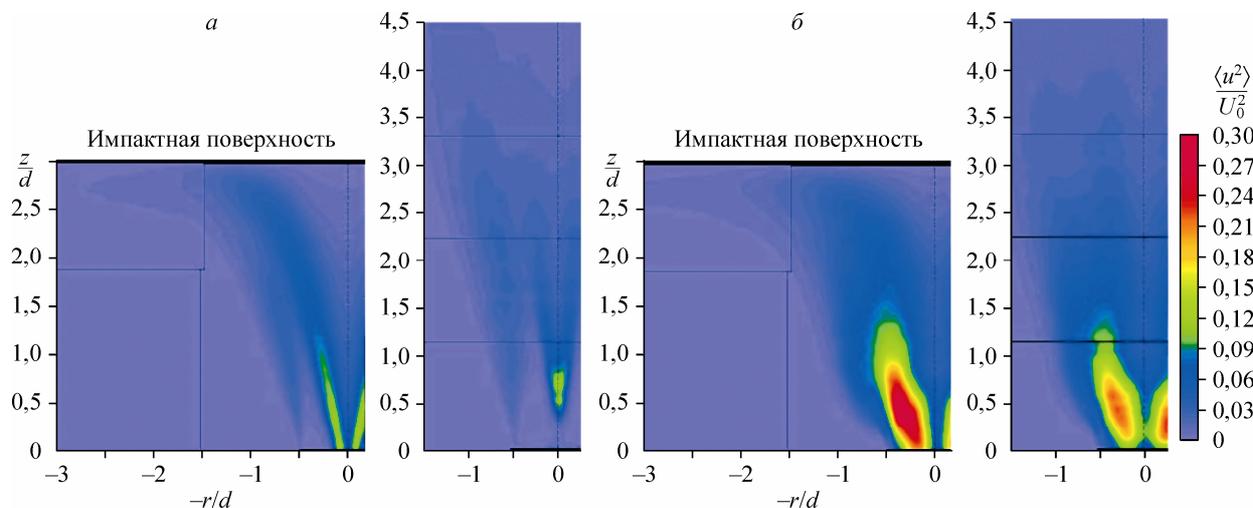
### **Программа 3.5.2. Волновые процессы, организованные структуры и турбулентность в одно- и двухфазных потоках**

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаедаладе с использованием метода стерео PIV и адаптивных алгоритмов обработки данных экспериментально изучена турбулентная структура свободных и импактных струй в широком диапазоне значений параметра закрутки: от нулевых до  $S = 1$ . Для данных условий измерены пространственные распределения средней скорости и статистических моментов турбулентных пульсаций (до третьего порядка включительно), детально исследовано влияние закрутки на структуру потока, показано, что наличие импактной поверхности (на расстояниях до трех калибров) оказывает наибольшее влияние на струю со слабой закруткой ( $S = 0,4$ ; рис. 19). В ряде сечений потока, с использованием возможности метода PIV измерять мгновенные поля производных скорости, а также с применением разработанной уникальной методики коррекции данных, измеренных с конечным пространственным разрешением, впервые рассчитаны все члены уравнения баланса кинетической энергии турбулентности для данного класса течений.

Экспериментально исследовано влияние комбинированного наложения внешней закрутки и внешних периодических возмущений

продольной скорости потока (в широком диапазоне частот и амплитуд) на гидродинамическую структуру закрученных струй. Впервые обнаружено, что для течений с высокой степенью закрутки при превышении определенного уровня внешних возмущений (5 % по амплитуде) с относительно высокими частотами ( $St \approx 1,2$ ) имеет место спонтанная перестройка течения с резкой интенсификацией турбулентного перемешивания. Анализ пространственной структуры ансамбля мгновенных распределений скорости показал, что данный эффект является следствием генерации крупномасштабных спиральных вихревых структур с направлением вращения, обратным по отношению к основной закрутке потока.

В том же Институте выполнено исследование пульсаций температуры и волновых характеристик течения пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. С использованием инфракрасного сканера получены экспериментальные данные по изменению во времени температуры на локальном участке поверхности пленки жидкости при прохождении волн. Поле толщин пленки жидкости в области нагревателя определено посредством флуоресцентного метода. Для измерения динамики



**Рис. 19.** Пространственные распределения продольной компоненты кинетической энергии в свободной и импактной закрученных струях.

*a* — малая закрутка  $S = 0,41$ ; *б* — большая закрутка  $S = 0,70$ .

толщины пленки во времени применен восьмиканальный емкостный датчик, установленный в нижней части нагревателя.

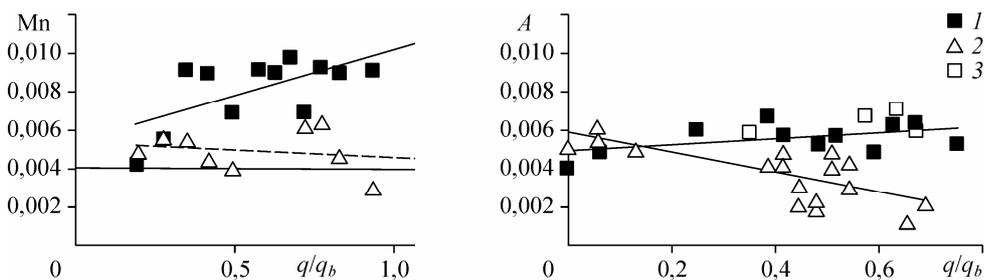
В отсутствие теплового потока полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследователей для изотермической пленки жидкости. При нагреве стекающей жидкости термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними.

Два термокапиллярных эффекта проявляются в межструйной области по мере увеличения плотности теплового потока. Поперечные градиенты температуры вызывают существенное уменьшение толщины пленки жидкости, а продольные градиенты — рост относительной амплитуды волн и модифицированного числа Марангони по сравнению с изотермическими условиями, что в конечном итоге приводит к разрыву пленки и появлению сухих пятен.

Трехмерные волны распространяются по гребням струй и приводят к увеличению абсо-

лютных амплитуд пульсаций толщины и температуры на их поверхности, но относительная амплитуда волн и модифицированное число Марангони убывают с увеличением плотности теплового потока (рис. 20) и слабо отличаются от изотермического течения.

В том же Институте с использованием метода PIV проведены измерения мгновенных распределений скорости в волновой пленке жидкости, стекающей по наклонному цилиндру. Для корректировки искажений, связанных с кривизной межфазной поверхности, разработана методика коррекции, основанная на предварительной оптической калибровке. Для различных волновых режимов и углов наклона в системе отсчета, связанной с фазовой скоростью волн, зафиксировано вихревое движение жидкости в горбах волн (рис. 21). Получены мгновенные и осредненные профили продольной компоненты скорости жидкости в различных сечениях развитых нелинейных волн. Показано, что для всех исследованных режимов



**Рис. 20.** Зависимости модифицированного числа Марангони  $Mn$  и относительной средней амплитуды  $A$  от безразмерного теплового потока для межструйной области (1, 3) и струи (2).



Рис. 21. Поле скорости в волновом ривулете.

профиль продольной компоненты скорости в области максимальных толщин более заполнен по сравнению с параболическим.

Напротив, в области минимальных значений толщины профиль менее заполнен. В остаточном слое профиль скорости хорошо описывается формулой Нуссельта. Впервые получены мгновенные профили для поперечной компоненты скорости в различных сечениях волны. Проведен анализ структуры вихревого движения в волне при различных параметрах стекающей пленки. С ростом амплитуды волн, для заданного угла наклона цилиндра, положение центра вихря в абсолютных координатах изменяется слабо. С ростом угла наклона вихревое движение смещается к свободной поверхности и становится менее интенсивным.

Новизна и значимость работы заключаются в адаптации метода PIV к течению ривулета, объекту малого масштаба и с высокими градиентами скорости. Впервые зафиксировано интенсивное вихревое движение жидкости внут-

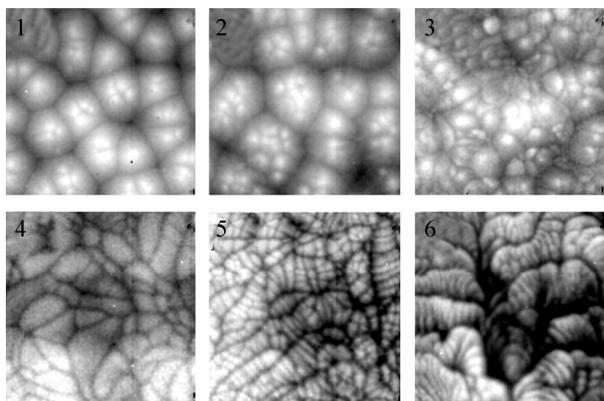


Рис. 22. Эволюция поля температуры на открытой поверхности слоя этилового спирта в зависимости от высоты слоя  $H$  и перепада температуры между границами слоя.

Для режимов 1—3 видимое поле  $140 \times 140$  мм и для режимов 4—6 —  $52 \times 52$  мм. 1 —  $H = 3,8$  мм,  $\Delta T = 0,51$  К; 2 — 4,8, 0,7; 3 — 11, 0,88; 4 — 25, 1,21; 5 — 25, 1,51; 6 — 25 мм, 3,26 К соответственно.

ри горба волны на пленке жидкости. Подобные измерения имеют принципиальное значение для проверки допущений об автомодельности профиля скорости, а также для обоснования гипотез о наличии вихреобразования в волнах, что является одним из механизмов интенсификации теплопереноса в волновой ламинарной пленке.

В том же Институте на основе методик визуализации жидкости частичками трассерами с размерами  $10\text{--}15$  мкм и цифровой видеосъемки в горизонтальной плоскости (вид сверху) и по нормали к горизонтальным границам (вид сбоку) исследована эволюция пространственной формы и полей скорости в слоях с двумя жесткими изотермическими границами и в слоях со свободной верхней границей (рис. 22). В первом случае течение имеет термогравитационный характер, во втором — тепловой гравитационно-капиллярный. Характеристики полей температуры измерялись микротермопарными зондами. Кроме того, поле температуры на свободной поверхности жидкости измерялось тепловизором. Видеофильмы и тепловизионные фильмы обработаны с использованием пакетов программ, разработанных в лаборатории. Доказана идентичность пространственных форм течения визуализированной и чистой жидкости. Исследованы процессы усложнения пространственной формы течения за счет появления мелкомасштабного течения (до 4—5-го порядка) на фоне основного, предшествующего. Расшифрованы механизмы развития некоторых типов колебаний на фоне ячеистого одномодового и многомодового течений. Для течений в ограниченных слоях с жесткими границами в диапазоне  $2 \leq L/H \leq 20$  проведены численные исследования структуры течения при числах Рэлея  $10^3 \leq Ra \leq 2 \cdot 10^4$  при  $Pr = 0,01, 0,05, 15, 2700$ . Полученные результаты существенно дополняют знания о многостадийном процессе ламинарно-турбулентного перехода в рэлей-бенаровскую конвекцию. Результаты имеют также практическое значение, поскольку рэлей-бенаровский тип неустойчивости характерен для ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях под фронтом кристаллизации, при получении монокристаллов методом Чохральского и при росте эпитаксиальных слоев из растворов в расплаве на монокристаллических подложках. Полученные результаты позволяют осознанно выбирать диапазоны технологических параметров для получения совершенных кристаллов и пленок.

**Программа 3.5.3. Гидродинамические явления в природных и технических системах (водотоках и водоемах, нефте- и газопроводах, пористых средах, тепловых энергетических установках)**

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева созданы компьютерные модели динамики вторжения фильтрата бурового раствора под действием избыточного давления в газонефтяной коллектор при бурении вертикальных и горизонтальных скважин. Лежащая в основе теория учитывает литологию коллектора, изменения режимов бурения, образование глинистой корки на стенке скважины, различие плотностей бурового раствора и пластовой жидкости, многофазность жидкого состава и слоистость нефтяного коллектора. Контроль за зоной проникновения фильтрата бурового раствора в пласт позволяет правильно интерпретировать данные геофизических измерений. Программный комплекс апробирован при обработке данных электромагнитного каротажа ряда скважин на месторождениях Западной Сибири.

Разработан новый метод интерпретации данных скважинного зондирования, впервые получена возможность по данным высокочастотного индукционного каротажа устанавливать количественную оценку содержания нефти и газа в пласте.

Построена двухмасштабная модель переноса ионов в пористой среде для случая одномерных горизонтальных течений.

Предложен метод, позволяющий в рамках первого приближения теории мелкой воды моделировать процесс распространения прерывных волн по сухому руслу. Проведен сравнительный анализ решений задачи о разрушении.

Построены точные решения уравнений Эйлера, описывающие вращательно-симмет-

ричные движения идеальной несжимаемой жидкости.

Исследовано движение протяженного слоя жидкости малой глубины и ограниченной ширины под действием спутного потока газа при переменной гравитации.

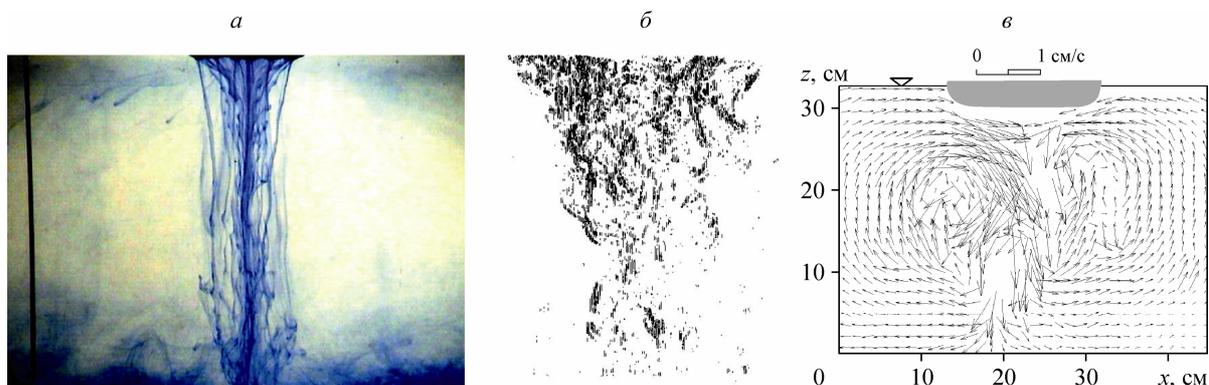
Доказана разрешимость задачи о двумерных течениях жидкости Бингама с периодическими краевыми условиями.

Построено аналитическое решение плоской задачи об ударе гидравлическим прыжком по вертикальной пористой и перфорированной стенке. Получены оценки максимального давления, гидродинамической нагрузки и массы протекающей через перфорации жидкости.

Экспериментально исследована задача о двойной диффузии в случае таяния пресного льда в соленой воде. Проведены визуализация течений с помощью теневого метода и измерение скоростей течений с помощью метода PIV (рис. 23).

Получена экспериментальная информация о силовом воздействии волн после полного разрушения плотины в прямоугольном канале с ровным горизонтальным дном на вертикальный и горизонтальный круговой цилиндр.

Проведено экспериментальное исследование поля внутренних волн и течений, возникающих при круговых колебаниях кругового цилиндра в линейно-стратифицированной жидкости. Продемонстрирован ряд существенно нелинейных эффектов, которые не наблюдаются в случае поступательных прямолинейных колебаний.



**Рис. 23.** Таяние пресноводного льда в соленой воде.

*a* — картина течения, *б* — визуализация возмущений поля плотности теньевым методом, *в* — измерение поля скоростей методом PIV.

### Программа 3.5.4. Влияние локального силового и энергетического воздействия на до-, сверх- и гиперзвуковые течения

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича впервые экспериментально исследована динамика развития псевдоскачка и установления квазипериодического течения в канале при периодическом его дросселировании (давление торможения  $P_0 = 3\text{—}9$  ата, частота  $\nu = 1\text{—}15$  Гц). По формированию структуры течений это идентично периодическому подводу энергии (рис. 24).

Показано, что может быть получено существенное уменьшение интенсивности падающей ударной волны при взаимодействии ее с тепловым дозвуковым следом, образующимся при обтекании сверхзвуковым потоком с числом Маха  $M_\infty = 2$  импульсно периодического источника энергии.

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 раз-

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

Установлено, что импульсно-периодический подвод энергии разрушает сверхзвуковую зону под профилем при трансзвуковом обтекании, а замыкающий скачок уплотнения, расположенный выше профиля, сдвигается к задней кромке. Принципиально меняется вид аэродинамической поляры: по величине подводимой энергии наблюдается эффект насыщения (рис. 25). Выявлен и объяснен эффект стабилизации трансзвукового обтекания профиля в зависимости от одностороннего подвода энергии, аналогичный эффекту стабилизации, установленному академиком С. А. Христиановичем, для зависимости распределения давления по контуру профиля от числа Маха. Разработана методика оценки энергетической эффективности импульсно-периодического подвода

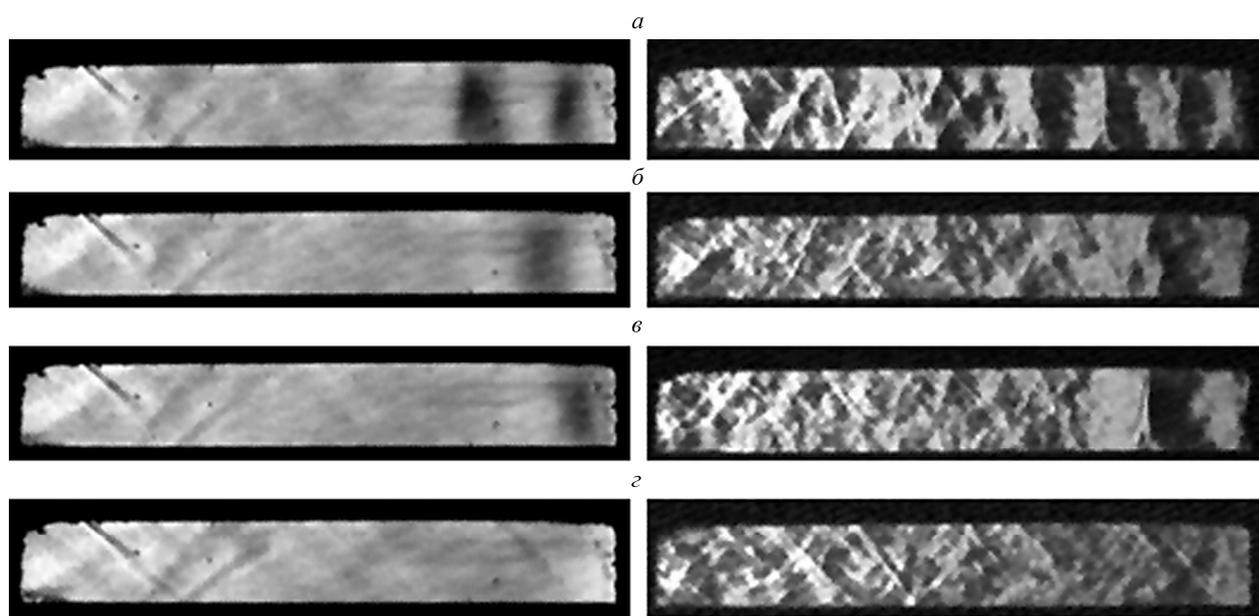


Рис. 24. Теневые фотографии стационарных режимов псевдоскачка для разных давлений потока, снятые с различными временами экспозиции (слева —  $1/50$  с, справа —  $1/100000$  с).

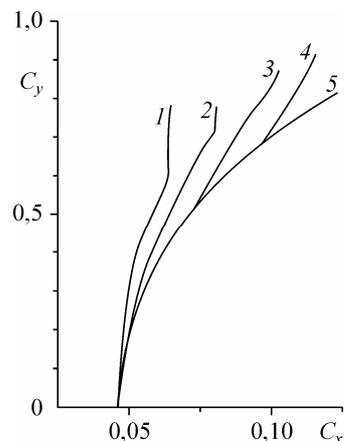
$P_{\text{фк}}$ , ата: 5,5 (а), 6,0 (б), 6,5 (в), 7,0 (г).

энергии около профиля на трансзвуковых режимах обтекания.

Показано, что уединенная  $\lambda$ -структура трансформируется в турбулентное пятно вниз по потоку на гладкой поверхности плоской пластины за счет мультиплицирования  $\lambda$ -структур и установлено, что риблеты предотвращают трансформацию  $\lambda$ -структуры в турбулентное пятно и приводят к затуханию возмущения.

Показано, что механизм нелинейного варикозного разрушения полосчатой структуры, генерированной шероховатостью в пограничном слое прямого крыла, в области неблагоприятного градиента давления связан с процессом развития на ней вторичного высокочастотного возмущения и образованием когерентных структур типа  $\lambda$ -вихрей. Данный процесс приводит к трансверсальному расплыванию возмущенной области и мультиплицированию как полосчатых структур, так и  $\lambda$ -вихрей вниз по потоку.

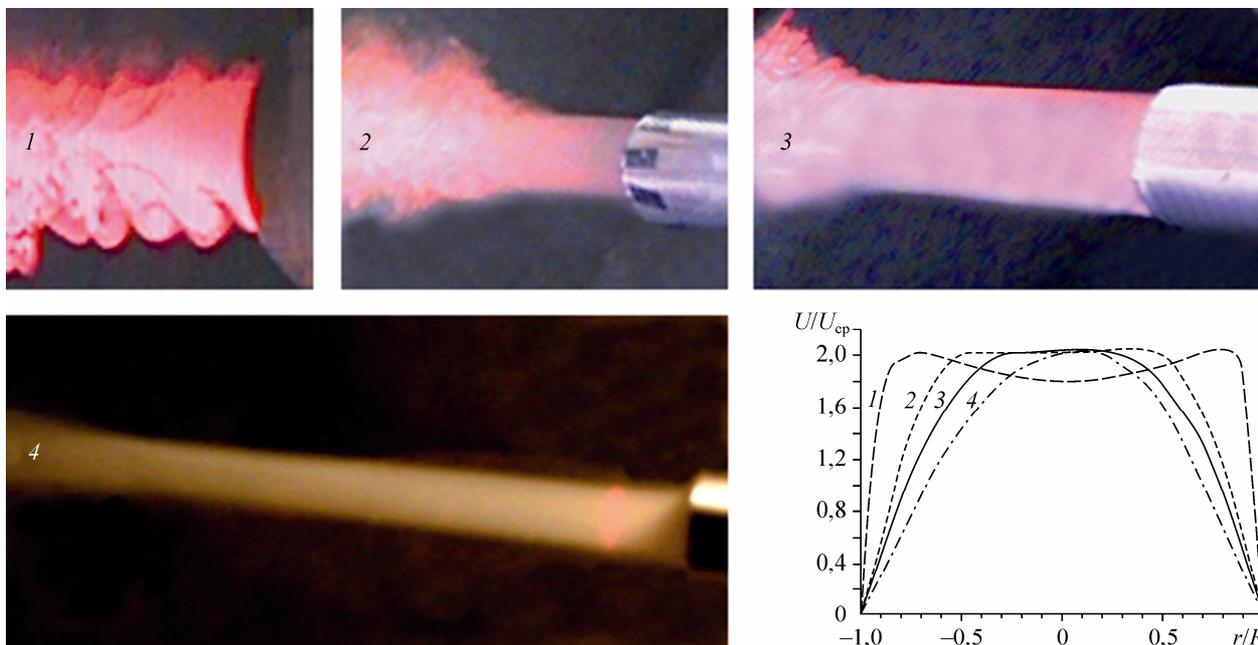
Впервые показана возможность управления структурой течения в круглой струе с по-



**Рис. 25.** Зависимость коэффициента подъемной силы от коэффициента волнового сопротивления профиля.

1—4 — кривые при варьировании подводимой энергии  $\Delta E$  для фиксированных углов атаки  $\alpha$  (0 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4)), 5 — классическая поляра.

мощью изменения начальных условий (профилей скорости) на срезе сопла за счет удлинения соплового канала (рис. 26).



**Рис. 26.** Дымовая визуализация круглой струи в зависимости от профиля скорости на срезе сопла и профили скорости на срезе сопла, соответствующие картинам дымовой визуализации течения,  $Re = 6667$ .

1 — классическая струя; 2 — струя при удлинении канала сопла на 430 мм (ламинарный участок  $l/d = 2$ ); 3 — струя при удлинении канала сопла на 870 мм (ламинарный участок  $l/d = 4$ ); 4 — струя при удлинении канала сопла на 4000 мм (ламинарный участок  $l/d = 10$ ).  $l$  — длина струи,  $d$  — диаметр трубы.

### Программа 3.5.5. Аэродинамика и термодинамика элементов сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов нового поколения

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

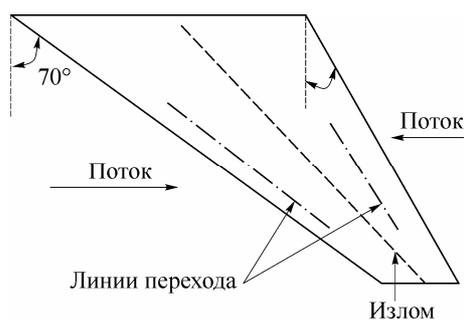


Рис. 27. Линия ламинарно-турбулентного перехода параллельна передней кромке крыла.  
Число Маха  $M = 2$ .

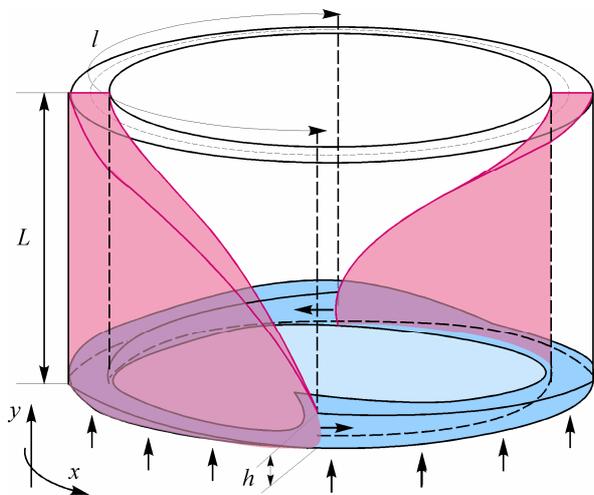
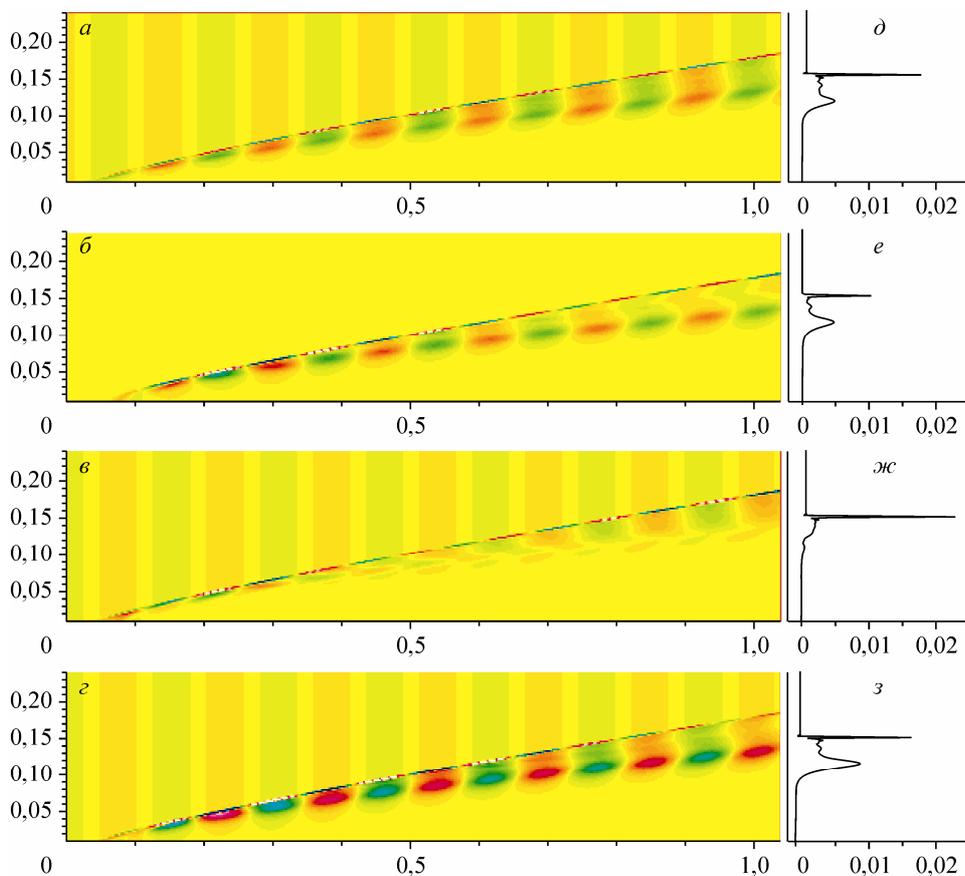


Рис. 28. Схема распространения детонационной волны в кольцевом канале.

раллельна передней кромке крыла (рис. 27), независимо от угла стреловидности. Тем самым обосновывается возможность использования упрощенной модели (скользящего крыла) для теоретических и экспериментальных исследований нестационарных процессов в областях перехода в сверхзвуковых трехмерных пограничных слоях.

Разработана физическая модель течения вязких реагирующих газов на основе полных нестационарных уравнений Навье—Стокса и высокоточной двухстадийной кинетической модели химической кинетики. С использованием данной модели создан и отлажен параллельный вариант кода для расчета вязких течений. Проведены расчеты структуры фронта детонационной волны в узких каналах (размер канала меньше размера детонационной ячейки) с использованием данной модели вязкого реагирующего газа (рис. 28). Разработан расчетный код для решения уравнений Эйлера с детальной моделью химической кинетики.

Впервые реализовано активное управление интенсивностью пульсаций в гиперзвуковом вязком ударном слое. Экспериментально и теоретически показано, что пульсации в ударном слое на пластине, генерируемые внешними акустическими волнами, могут быть подавлены вводимыми с поверхности тела контролируемые периодическими возмущениями при условии подбора соответствующих амплитуды и фазы. Результаты эксперимента полностью подтверждены прямым численным моделированием пульсаций в ударном слое на основе полных двумерных нестационарных уравнений Навье—Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка (рис. 29).



**Рис. 29.** Поле изолиний мгновенных пульсаций плотности в ударном слое (*a—г*) и среднеквадратичных пульсаций плотности в сечении  $x = 0,8$  (*д—з*) при  $M_\infty = 21$ ,  $Re_L = 1,44 \times 10^5$ , частоте вводимых возмущений  $f = 38,4$  кГц и нулевом угле распространения внешней акустической волны  $\theta = 0^\circ$ .

*a, д* — медленная акустическая волна с амплитудой  $A_{nat} = 0,001$ ; *б, е* — вдув-отсос газа с поверхности пластины с амплитудой  $A_{art} = 0,06$ ; *в, ж* — противофазное воздействие; *г, з* — синфазное воздействие.

### Программа 3.5.6. Детонационные и ударно-волновые процессы в газовых, гетерогенных и конденсированных средах

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева показано, что методом детонационного напыления можно с высокой прочностью закрепить металлические частицы на поверхности широкого спектра пластмассовой продукции. На основе анализа металлических сплэтов на подложке из пластика выявлен механизм металлизации пластика. Установлено, что внедрение металлических частиц возможно в узком диапазоне «деликатного вплавления», за пределами которого идет либо механическая эрозия пластика «холодными» частицами порошка, либо термоэрозионное разрушение «перегретыми» частицами без форми-

рования слоя покрытия. На изделия из капрлона, фиброгласса, полиэстера, фторопласта и других пластмасс легко наносятся покрытия из алюминия, цинка и олова. Прочность связи таких детонационных покрытий достигает  $100 \text{ кг/см}^2$ . Причем через «тонкий» подслоя легкоплавкого металла можно наносить и тугоплавкие материалы, включая керамику.

Устойчивая реализация таких «деликатных» режимов стала возможной на детонационных установках нового поколения (рис. 30). Благодаря повышенной (в несколько раз) точности системы газопитания и строго локализованной подаче порошка в нем исключительно



Рис. 30. Комплекс детонационного напыления для металлизации фторопласта.

тонко программируется энергетическое воздействие взрывчатых газов на частицы порошка, что стало решающим качеством для прецизионного управления параметрами порошковых частиц легкоплавких материалов.

По итогам двухлетней работы технологического участка получен Отзыв (Акт внедрения), в котором отмечена стабильная работа всех узлов детонационного комплекса и отражен объем выпущенной продукции (примеры на рис. 31), достигший нескольких сотен квадратных метров металлизированной поверхности изделий.

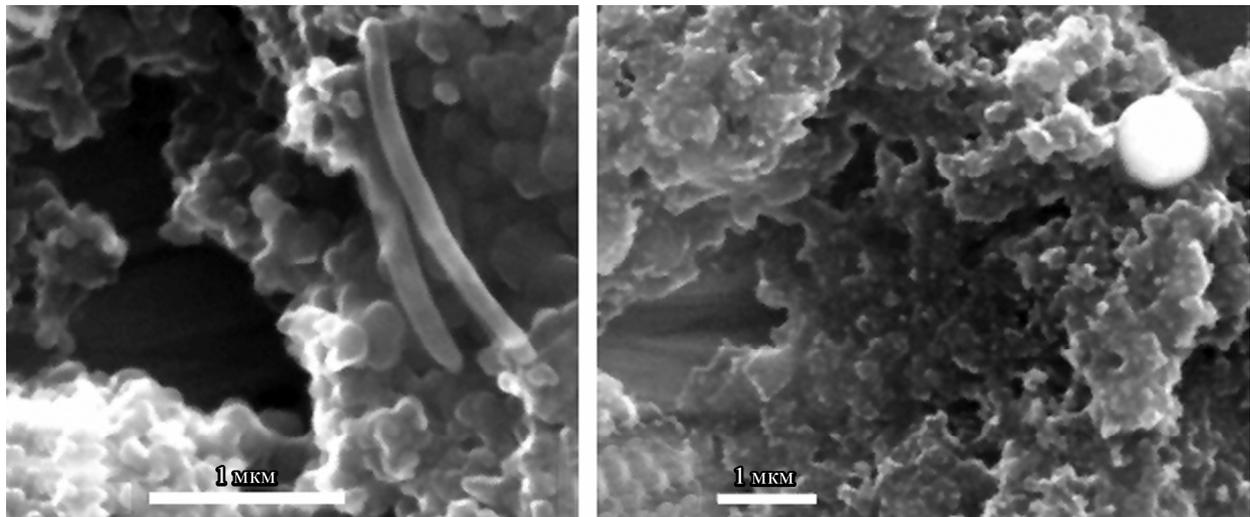
В том же Институте ударно-волновой синтез осуществлен в плоских и цилиндрических ампулах сохранения. Исходным материалом является гексагональная фаза  $\text{Si}_3\text{N}_4$  или ее смесь с металлическими порошками: медным, никелевым и свинцовым. Максимальный выход

$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  — нанодисперсного порошка со средним размером кристаллитов 12 нм — составил 40—50 мас.% и был получен при давлении в образце 53 ГПа, содержании меди более 60 об.% и пористости образца 1,45. Кроме  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ , продукт синтеза содержал аморфную фазу нитрида кремния. Анализ параметров синтеза и структуры синтезированного материала позволил выдвинуть и обосновать утверждение, что кубический нитрид кремния за фронтом ударной волны кристаллизуется из расплава нитрида кремния.

Показано, что  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  стабилен в вакууме и на воздухе при нагреве до температуры 1300 °С. В диапазоне температур 20—1300 °С, вплоть до температуры обратного перехода из  $\alpha$ -фазы в  $\beta$ -фазу, определен коэффициент термического расширения синтезированного материала, при 20 °С он составил  $4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . С помощью



Рис. 31. Образцы фторопластовой продукции с алюминиевым покрытием.



**Рис. 32.** Трубчатые (слева) и фуллереноподобные углеродные кластеры, получаемые в волнах газовой детонации.

ударно-волнового компактирования и высокотемпературного спекания под высоким давлением получены объемные образцы из синтезированного материала с содержанием кубической фазы до 50 %. Микротвердость образцов составила  $H_V = 30$  ГПа при нагрузке на индентор 200 г.

Представлены расчетные и экспериментальные результаты исследований образования углеродных кластеров при распространении волн горения и детонации в обогащенных ацетиленокислородных и ацетиленовоздушных смесях. Эксперименты проведены в трубах различного диаметра (в том числе заполненных пористой средой) при широком варьировании начального давления и соотношения горючее—окислитель.

Несмотря на скоротечность протекания реакции в детонационных волнах обнаружено большое разнообразие углеродных кластеров от нано- до микро размеров, получаемых при различных режимах сгорания смеси (например, трубчатые и фуллерено-подобные кластеры как на рис. 32).

Установлено, что масса образовавшихся кластеров зависит от типа волн: при горении количество сконденсировавшегося углерода выше, чем при детонации. При детонации в пористой среде относительная масса сажи примерно в два раза меньше, чем в трубе без шариков.

Экспериментально исследовано световое излучение, возникающее при нагружении высокотемпературного полимера — фтороплас-

та — ударной волной (УВ) интенсивностью 51 ГПа, для определения локализации источников излучения, установления длительности светового импульса и временной корреляции между излучением и УВ во фторопласте, для выяснения влияния качества подготовки контактной поверхности на световое излучение. Профили ударно-индуцированного излучения сопоставлены с измерениями проводимости фторопласта.

Обнаружено сильное влияние качества подготовки контактных поверхностей на форму сигнала светового излучения и определена локализация источников излучения. Установлено, что при наблюдении ударно-индуцированного излучения регистрируется суммарное излучение из зоны контактной границы и из зоны, примыкающей к фронту УВ. Это позволило разделить вклад контактных и объемных источников излучения и зарегистрировать рост интенсивности излучения только в результате распространения УВ по образцу фторопласта. Полученные временные зависимости находятся в качественном согласии с законом поглощения Бугера—Ламберта в предположении постоянного коэффициента поглощения в полимере перед фронтом УВ. Расчет формы светового импульса с некоторыми упрощающими предположениями об излучательной способности плоского слоя ударно-сжатого фторопласта и о постоянстве коэффициентов поглощения в веществе перед фронтом и за фронтом УВ позволяет получить удовлетворительное согласие с экспериментом (рис. 33). Определены диапа-

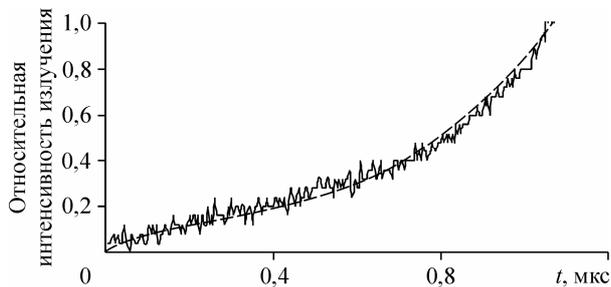


Рис. 33. Зависимость относительной интенсивности излучения от времени.

Сплошная линия — эксперимент; штриховая — расчет.

зоны значений коэффициентов поглощения ударно-сжатого ( $2\text{--}5 \text{ мм}^{-1}$ ) и несжатого ( $0,2\text{--}0,3 \text{ мм}^{-1}$ ) фторопласта.

Обнаружено, что электросопротивление образца фторопласта уменьшается от значений порядка  $10^4\text{--}10^3 \text{ Ом}$  до замыкания второго электрода ударной волной. Высказано предположение о возникновении впереди ударной волны зоны проводимости, опережающей фронт примерно на 2 мм, которая обусловлена излучением с контактной поверхности.

### Программа 3.5.7. Нестационарные процессы при высоких плотностях энергии в гидродинамике однородных и многофазных сред (структура течений, синтез наноструктурных соединений, волновые процессы)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева в рамках метода кумулятивного синтеза для системы W—C до давлений 30 ГПа впервые установлена граница области (кривая 4 на рис. 34), где осуществляется динамический синтез кубической модификации карбида вольфрама ( $\beta\text{-WC}$ ).

В том же Институте при участии КТФ ИГиЛ изготовлен опытный образец растворителя РКП-ИПТ (масштаб 1 : 1), на котором проведены эксперименты, показавшие возможность выгрузки 450 кг имитаторов отработавшего ядерного топлива (нерастворимых фрагментов ТВС) шестью—семью газовыми

импульсами вместо 40, заложенных в технологический регламент для растворителей подобного типа (рис. 35).

Разработан электромагнитный метод измерения кинематических параметров ударной

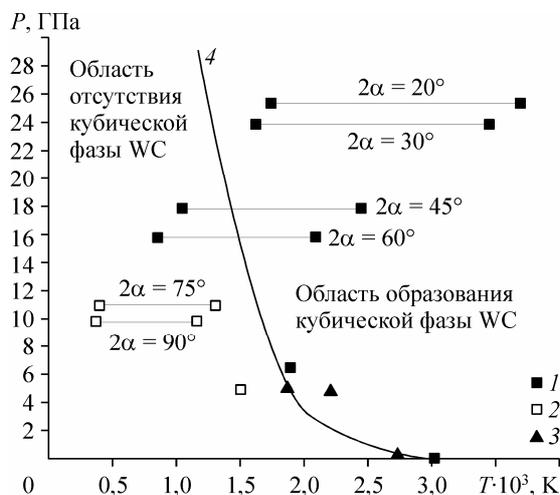


Рис. 34. Диаграмма состояния системы W—C с областью динамического синтеза фаз карбида вольфрама: кубической (1) и гексагональной (3); 2 — фазы не обнаружены, 4 — граница раздела.



Рис. 35. Опытный образец растворителя РКП-ИПТ.

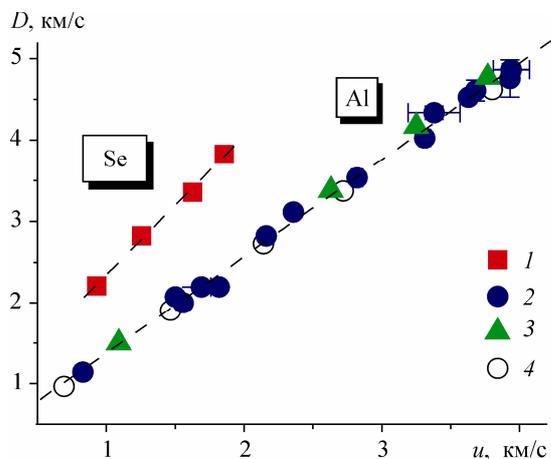


Рис. 36. Результаты измерений массовой и волновой скорости.

1 — Se, 3,1 г/см<sup>3</sup>; 2 — Al, 0,37 г/см<sup>3</sup>; 3 — Al, 0,51 г/см<sup>3</sup>; 4 — Al, 0,34 г/см<sup>3</sup>.

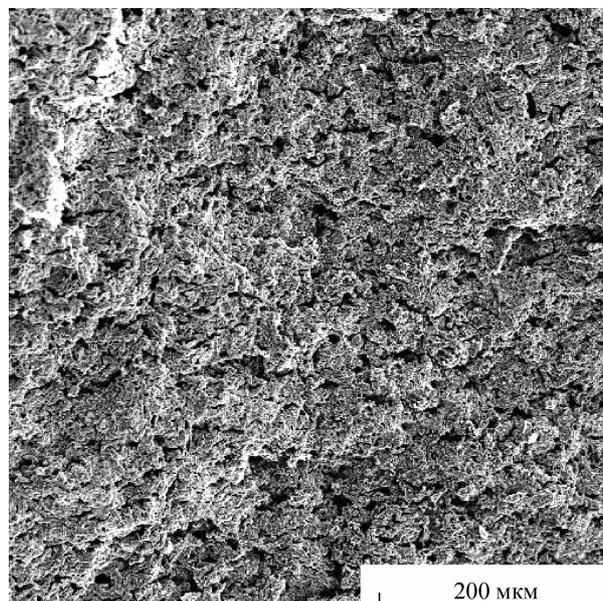


Рис. 37. Структура порошковой смеси Cu–Ti–В после действия электрического импульса.

волны (массовая и волновая скорости) для материалов, приобретающих электрическую проводимость при ударном сжатии. Построены ударные адиабаты порошков селена и алюминия для различных плотностей и размеров частиц (рис. 36). Показано, что электропроводность алюминиевого порошка возникает в ударной волне, несущей полное давление. Настоящие результаты позволяют обосновать предложенную ранее модель ударно-волновой кумуляции магнитного поля.

Впервые в одиночном электрическом разряде произведены синтез диборида титана с размерами кристаллитов  $\leq 20$  нм в смеси порошков Cu–Ti–В и спекание композита Cu–TiV<sub>2</sub> (рис. 37).

Впервые измерены поля скорости в горизонтальном и осевом сечениях огненного торнадоподобного вихря. Установлено, что качественно структура течения в огненном вихре аналогична структуре интенсивных атмосферных вихрей (ураганов, смерчей, пыльных вихрей), а полученное ранее аналитическое соотношение для параметров, характеризующих вертикальные торнадоподобные вихри, справедливо и для огненного вихря (рис. 38). Таким образом, установлено подобие данных вихревых образований, несмотря на огромное различие их размеров, скоростей течения в них и температур.



Рис. 38. Фотография вращающегося сосуда и пламени после образования огненного торнадоподобного вихря.

### Программа 3.5.8. Теплофизические основы плазмохимической конверсии энергетических сред

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе предложена новая схема организации процесса электрохимического окисления твердых углеводородов при использовании в качестве электролита расплава карбонатов. Анод и катод, выполненные из сетки, заполнялись топливом и окислителем и располагались непосредственно в расплаве электролита (рис. 39). В качестве окислителя использовались кислород или воздух.

Изучены электрофизические характеристики процесса при использовании различных углеводородов в качестве топлив, в том числе: каменный уголь, антрацит, отходы пластиков (пластиковые бутылки), древесные опилки, графит. При температуре электролита  $7600\text{ }^{\circ}\text{C}$  напряжение разомкнутой цепи составляло, В: 0,95, 1,1, 1,15, 0,85 для угля, опилок, пластиковых отходов, графита соответственно, плотность мощности для перечисленных материалов изменялась в диапазоне  $70\text{--}100\text{ мВт/см}^2$ , максимальные значения плотности тока (режим короткой цепи) достигали  $250\text{ мА/см}^2$ .

Результаты исследования электрохимического окисления твердых углеводородов в условиях предложенной схемы получены впервые. Показано, что с увеличением concentra-

ции водорода в топливном веществе эффективность электрохимической реакции окисления возрастает. Продемонстрирована возможность получения высоких удельных мощностей и токов, сопоставимых с характеристиками для расплавокарбонатных топливных элементов, работающих на водороде.

Учитывая беспрецедентно высокий КПД преобразования энергии окисления углерода в электрическую энергию в топливном элементе ( $\sim 80\%$ , т. е. вдвое выше, чем в традиционном энергетическом цикле сжигания), высокий коэффициент использования топлива ( $\sim 100\%$ ), экологичность, бесшумность, изучение процессов в топливных элементах на угле, биотопливе и других твердых углеводородах является важнейшим направлением исследований в области развития эффективных энерготехнологий. Существующие схемы электрохимических топливных элементов на угле пока не удовлетворяют практическим требованиям. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практической реализации предложенной схемы в реальных генераторах электроэнергии.

В том же Институте выполнен комплекс научно-исследовательских работ по созданию экспериментальных электродуговых плазмен-

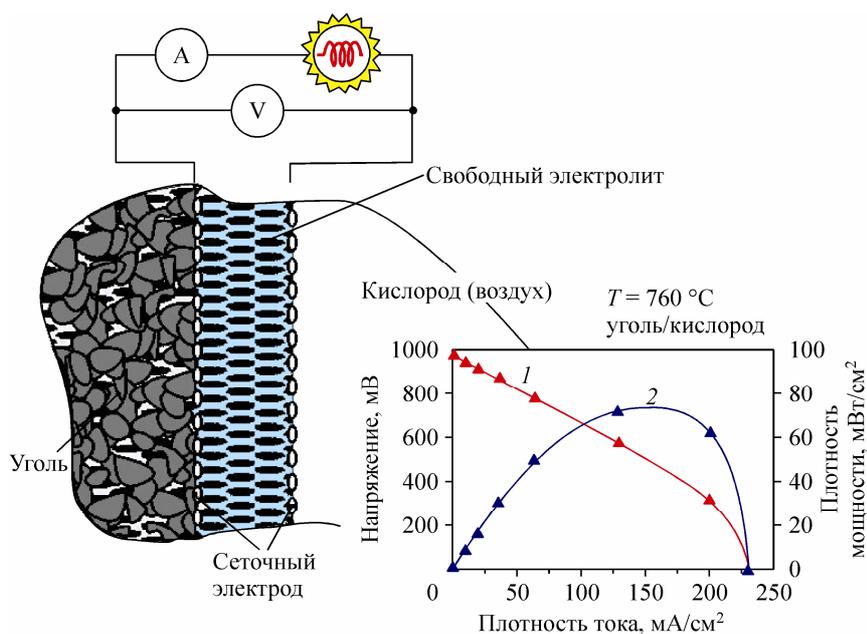


Рис. 39. Схема прямого окисления угля в топливном элементе. Вольт-амперные (1) и мощностные (2) характеристики элемента.

ных устройств и проведению технологических испытаний по газификации органических составляющих техногенных отходов.

Техногенные отходы и образования, как правило, имеют сложный морфологический состав и их можно квалифицировать как смешанные. В них находятся вредные и токсичные вещества, опасные для здоровья человека и природной среды. К эффективным способам их переработки, утилизации и уничтожения относятся плазменные технологии, при которых в реакционной зоне уровень температур составляет 1500—2000 К. При этом органическая составляющая отходов подвергается газификации с получением высококалорийного синтез-газа (9—11 МДж/м<sup>3</sup>), а неорганическая переходит в жидкий шлак с последующей его грануляцией, вспениванием, остекловыванием с целью придания ему экологически безопасного состояния. Синтез-газ (объемное содержание H<sub>2</sub> + CO составляет до 90 % и более) может быть использован в энергетике для получения тепловой и электрической энергии или в химических производствах для получения метанола, моторных топлив, чистого кремния и т. д.

Для реализации плазменной технологии газификации бытовых и промышленных отходов разработаны, изготовлены и прошли технологические испытания электродуговые плазмотроны и плазменно-дуговые электропечи различных конструктивных схем. Создана плазменная электропечь шахтного типа для переработки смешанных отходов с плазмотронами струйного и плавильного типов. Расчетно-экспериментальные исследования газификации отходов позволили определить зону максимального тепловыделения по высоте печи с учетом радиационного теплообмена и химических реакций в шихте, влияние состава, влажности отходов, расхода плазмообразующего

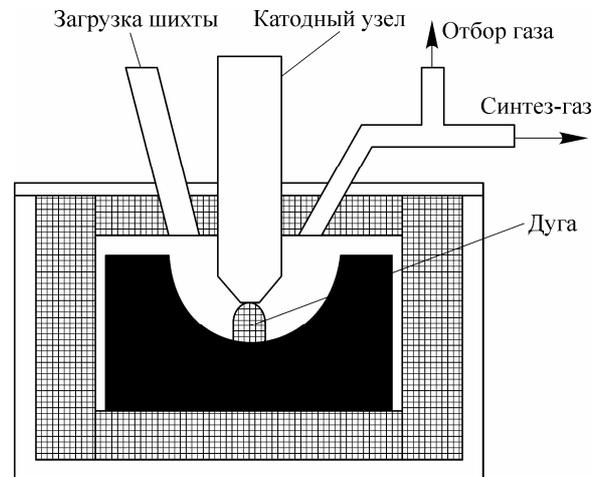


Рис. 40. Схема экспериментальной установки для переработки биоотходов.

воздуха и мощности плазмотронов на удельные энергозатраты переработки/утилизации смешанных отходов (от 0,1 до 0,7 кВт·ч/кг), установить необходимость применения в качестве окислителя водяного пара вместо воздуха.

На плазменно-дуговой печи (рис. 40) проведены исследования по переработке биологических иловых осадков и рисовой шелухи. Полученный синтез-газ (90—97 об.%) пригоден для производства моторных топлив, удельные энергозатраты составили 1,2 и 0,57 кВт·ч/кг отходов соответственно. Зола рисовой шелухи состоит на 95—98 % из диоксида кремния, который по чистоте превосходит большинство природных кварцитов. Это свойство шелухи привлекает внимание возможностью производства кремния высокой чистоты для солнечной энергетики.

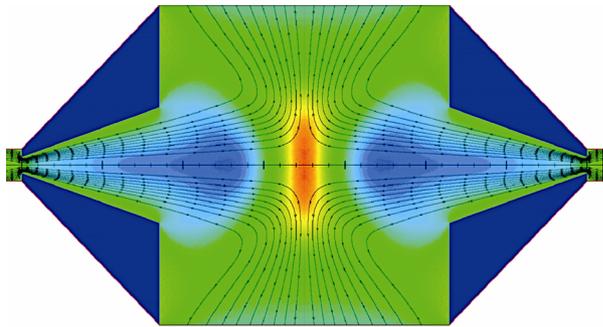
Полученные данные имеют существенное значение для экологической безопасности природы и человека.

### Программа 3.5.9. Физическая механика газового и плазменного формирования наноразмерных структур

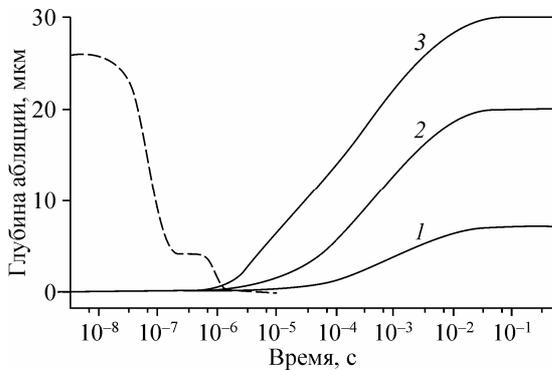
В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе установлены условия получения высоких температур в результате энергетического и концентрационного разделения смесей газов при столкновении с препятствием в режимах, переходных от сплошного к разреженному течению.

При столкновении сверхзвуковых струй газовых смесей в вакууме в переходных режи-

мах течения в результате инерционного разделения компонентов и трансформации энергии при замедленной поступательной релаксации возможно создание стационарного облака с температурами, намного превышающими температуру торможения. Анализ таких областей проведен прямым статистическим моделированием для случаев течения смесей He + Xe

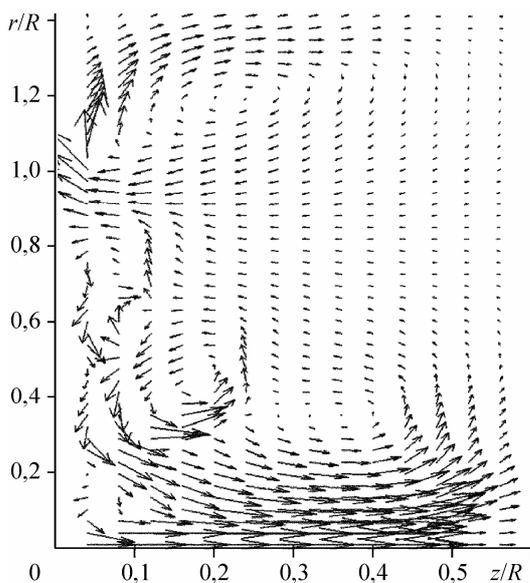


**Рис. 41.** Коллайдер. Состав смеси: 97,5 % He + 2,5 % Xe. Параметры торможения  $T_0 = 1000$  К,  $P_0 = 178$  мм рт. ст.



**Рис. 42.** Глубина абляции в зависимости от времени при испарении ПММА импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера.

Штриховой линией показана форма лазерного импульса. 1 —  $F_0 = 4,3$  Дж/см<sup>2</sup>,  $Z_{\text{subl}} = 7,15$  мкм; 2 —  $F_0 = 7$  Дж/см<sup>2</sup>,  $Z_{\text{subl}} = 20,2$  мкм; 3 —  $F_0 = 9$  Дж/см<sup>2</sup>,  $Z_{\text{subl}} = 30$  мкм.



**Рис. 43.** Вихревая структура, формирующаяся при абляции ПММА, на момент времени 10 мс после окончания действия лазерного излучения (интенсивность импульса 7 Дж/см<sup>2</sup>) в нормированных координатах.

$R$  — радиус пятна облучения.

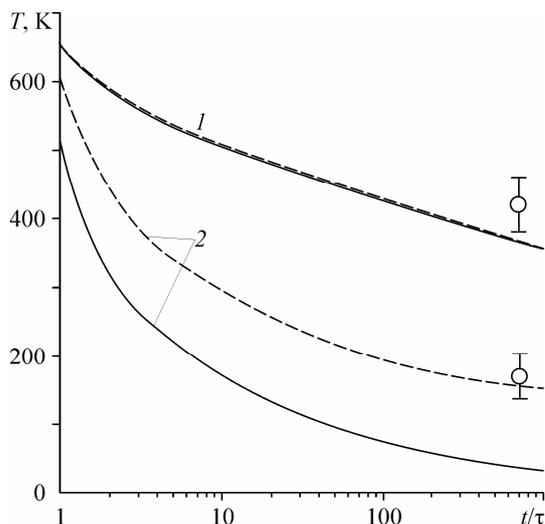
(рис. 41) и  $\text{H}_2 + \text{C}_2\text{F}_4$ . Возможность создания облака с экстремально высокими температурами продемонстрирована впервые. Эта схема течения может быть использована непосредственно для новых вакуумных технологий и для физических исследований неравновесных процессов в гипертепловой области течения и формирующихся из нее потоков.

Попутно найдена и исследована схема формирования высокотемпературного облака из конвергентного сверхзвукового потока газовой смеси. Ее отличительная особенность, привлекательная для приложений и исследований, есть многократное повышение относительной концентрации тяжелой компоненты (20-кратная для стационарной цилиндрической конвергенции), совмещенное с повышением температуры. Исследована также оригинальная схема столкновения струй от двух конвергентных источников.

Идея создания областей с температурой, превосходящей исходную температуру торможения, восходит к работам 60-х годов прошлого века в США и в Институте теплофизики, посвященным обтеканию затупленных тел разреженной газовой смесью. Систематическое исследование этих эффектов проведено авторами представляемой работы для случая поперечного обтекания пластин и цилиндров при числах Маха около 5. Например, в потоках гелия с 3%-й добавкой ксенона температура ксенона повышается в ударном слое в результате торможения ксенона на собственных атомах почти в 200 раз.

В том же Институте разработана гибридная модель лазерной абляции полимерных материалов, облучаемых импульсным лазерным излучением, основанная на комбинации тепловой модели, описывающей нагрев и фотоиндуцированную деполимеризацию, и газодинамической модели расширения продуктов абляции в фоновый газ с учетом диффузионного смешения. Для анализа вероятности радикальной полимеризации кластеров, формируемых в газовой фазе, разработан метод расчета полного энергобаланса лазерного излучения и его доли, идущей на возбуждение колебательных степеней свободы испаренных молекул.

С помощью модели выполнены исследования абляции полиметилметакрилата (ПММА) импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера в азоте атмосферного давления для широкого диапазона условий облучения. Выявлены характерные особенности лазерной абляции ПММА: значительное запаз-



**Рис. 44.** Временная эволюция средней поступательной (сплошные) и колебательной (штриховые линии) температур при испарении чистого анилина и смеси анилина с диоксидом углерода.

Кружки — экспериментально измеренные температуры.

дывание процесса абляции относительно лазерного импульса (рис. 42), эффективное смешение продуктов лазерного испарения с фоновым газом с формированием сложной вихревой структуры течения (рис. 43). Выполнены анализ эффективности полимеризации при газофазной конденсации в фоновом газе и термодинамический анализ состояния облучаемых материалов; найдены условия перехода от механизма тепловой (деполимеризации) к фазовому взрыву.

Разработанная модель позволяет проводить комплексное теоретическое исследование

лазерной абляции полимерных материалов в широком диапазоне условий, характерных для напыления полимерных пленок и синтеза наночастиц.

В том же Институте получено аналитическое решение, которое описывает расширение многоатомного газа в вакуум при импульсном испарении. На основе расчетов методом прямого статистического моделирования получены данные по числу столкновений в облаке во время разлета. Определена зависимость эффективного числа колебательных степеней свободы от числа колебательно неупругих столкновений. Полученные данные позволяют предсказать эффективный показатель адиабаты по известным параметрам задачи.

Построена система балансных уравнений для разлета облака. Получено аналитическое решение, которое описывает временную эволюцию осредненных значений газодинамических параметров облака (плотности, скорости и поступательной температуры). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов методом прямого статистического моделирования. Зная параметры облака, рассчитывают число столкновений в процессе разлета, которое затем используется для оценки колебательной температуры.

При помощи аналитического решения проведен анализ разлета облака паров анилина ( $C_6H_5-NH_2$ ). Определены колебательные температуры при испарении чистого анилина и смеси анилина с диоксидом углерода, которые хорошо соответствуют экспериментальным данным (рис. 44).