

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.22.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ, МНОГОФАЗНЫХ И НЕИДЕАЛЬНЫХ СРЕД, МЕХАНИКА ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

Программа Ш.22.1. Комплексный анализ гидродинамических аспектов функционирования природных систем и технических объектов в экстремальных условиях (координатор член-корр. РАН В. В. Пухначев)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева проведены расчеты параметров совместного движения жидкой пленки и газового потока в микроканалах. Впервые в полной мере учитывались все важнейшие физические факторы при их взаимодействии: деформации поверхности раздела, температурные зависимости свойств веществ, перенос тепла в жидкой и газовой фазах, процессы конденсации и испарения, динамическое воздействие газового потока на жидкость. Расчеты проводились в трехмерной постановке, для нестационарных процессов.

На рис. 19 показана температура поверхности раздела жидкость–газ при движении жидкости слева направо. На дне канала расположен ряд нагревателей различной интенсивности. При изучении закономерностей теплоотвода от источников тепла в микроканале была показана ключевая роль процессов испарения–конденсации на теплообмен. Движущиеся жидкие плен-

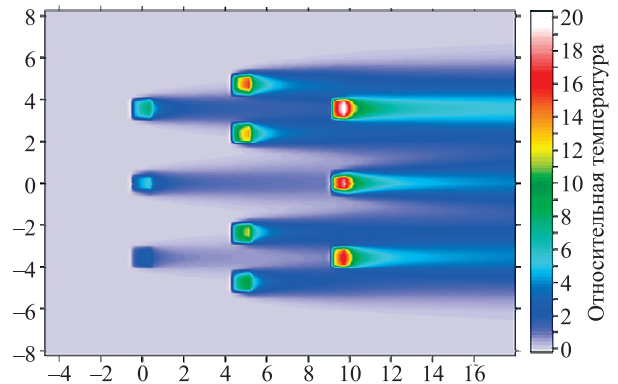


Рис. 19. Распределение относительной температуры на межфазной границе. Интенсивность (относительная) нагревателей меняется от 0,1 до 1,0. $Re = 7,5$; $Re_g = 10,0$.

ки могут быть использованы в системах охлаждения устройств микроэлектроники, особенно имеющих группы нагревателей малой протяженности.

Программа Ш.22.2. Детонационные и ударно-волновые процессы в газовых, гетерогенных и конденсированных средах и управление ими (координатор акад. В. М. Титов)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева разработан новый экспериментальный метод измерения тепловых потоков на стенках канала при горении или детонации в нем газовой смеси планарными термопарами. Тестирование термопар было проведено в ходе двух серий экспериментов. В первой серии лабораторных экспериментов с детонационным режимом использовалась металлическая труба длиной 7 м и диаметром 70 мм, в которую для измерения тепловых потоков от продуктов детонации смеси $CH_4 + 2O_2 + N_2$ помещалась батарея планарных термопар площадью $1,25 \text{ см}^2$, содержащая 250 элементов, что позволило получить значения тепловых потоков $\sim 1000 \text{ Вт/см}^2$, при начальном давлении газовой смеси 0,2 атм, и соответственно $\sim 2000 \text{ Вт/см}^2$ для начального давления газовой смеси 0,4 атм (рис. 20, а).

Вторая серия экспериментов, соответствующая шахтным условиям, была проведена в металлической трубе диаметром 1,8 м и длиной 15 м, частично заполненной метановоздушной смесью. Инициирование процесса производилось взрывом 100-граммового заряда детонита. Скорость распространения процесса в метановоздушной смеси составила 480 м/с, при этом его головная часть представляла собой ударно-сжатую метановоздушную смесь, за которой, с отставанием 5–7 мс, двигался фронт горения этой смеси. Полученные значения тепловых потоков составили $\sim 40 \text{ Вт/см}^2$ для головной части и $\sim 300 \text{ Вт/см}^2$ для области горения. На рис. 20, б изображены зависимости от времени количества тепла, полученного единицей поверхности канала, для различных сечений трубы. Показано, что полученное характерное

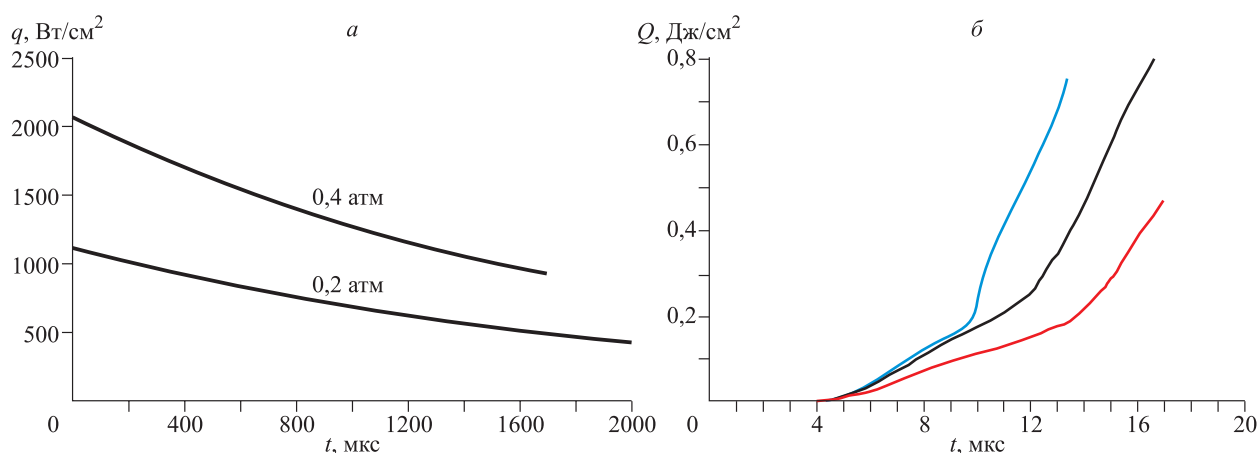


Рис. 20. Измеренные зависимости плотности тепловых потоков от времени.

время формирования термобатарей электрического импульса, составляющее ~ 1 мс, вполне достаточно для его использования в качестве

стартового сигнала при запуске систем пожаротушения, имеющих характерное время срабатывания ~ 100 мс.

Программа Ш.22.3. Гидродинамика неидеальных, многокомпонентных и многофазных сред, нестационарные и высокоскоростные процессы при динамическом, гравитационном, акустическом и электромагнитном воздействиях (координатор докт. физ.-мат. наук В. К. Кедринский)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева разработан комбинированный метод для сварки жаропрочных титановых и никелевых сплавов, состоящий из метода сварки взрывом (для получения композиционной вставки толщиной 0,5 мм четырех тонких пластин титана, тантала, меди и никеля) и метода SPS (spark plasma sintering) для сварки жаропрочных сплавов титана и никеля с соответствующими металлами на противоположных сторонах вставки. При проведении механических испытаний обнаружено, что прочность меди в сваренном композите оказалась выше прочности исходной меди, что связано с ее упрочнением в шве частицами тантала с размерами 5–10 нм, которые были зафиксированы при исследовании тонкой структуры области перемешивания (рис. 21). Стабильность структуры зоны соединения тантала и меди сохранялась при нагреве до 500°C , а прочность композита уменьшалась с нагревом незначительно, что позволяет рассматривать полученную сваркой взрывом композитную (титан–тантал–медь–никель) вставку перспективным диффузионным барьером для последующей сварки методом SPS жаропрочных титановых и никелевых сплавов.

В том же Институте построена модель возникновения вынужденных гидроакустических колебаний, которые имеют место при вынуж-

денных колебаниях жидкости в проточной части гидроагрегата, обусловленных прецессией вихревого жгута. Показана возможность их резонанса с продольными низкочастотными собственными гидроакустическими колебаниями в проточной части гидроагрегатов действующих гидростанций, в частности, гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС. Как следствие, это приводит к повышенному уровню вибраций турбин на соответствующих режимах их эксплуатации. Полученные теоретические результаты согласуются с результатами сейсмического мониторинга, проведенного на плотине этой ГЭС.

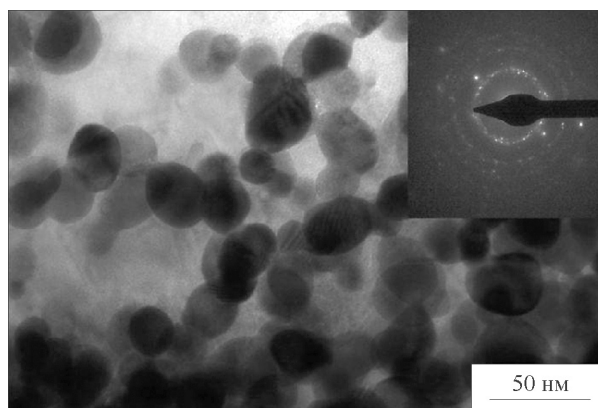


Рис. 21. Тонкая структура зоны перемешивания на границе сварки взрывом тантала (темные участки) и меди.

Программа Ш.22.4. Математический анализ моделей динамики неоднородных сред (координатор член-корр. РАН П. И. Плотников)

В Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева рассмотрена нелинейная задача о неустановившемся движении эллиптического цилиндра под свободной поверхностью идеальной жидкости. Исходные уравнения Эйлера преобразованы к эквивалентной системе интегро-дифференциальных уравнений на волновой поверхности. Ключевую роль в этой системе играет граничное интегральное уравнение, связывающее нормальную и касательную составляющие скорости жидкости. Ядра интегральных операторов данного уравнения зависят нелинейным образом от функции, задающей профиль волны. Для цилиндра, всплывающего из состояния покоя с постоянным ускорением, построены начальная асимптотика формы свободной поверхности и поля скоростей в виде разложения по целым степеням времени (рис. 22). Коэффициенты разложения найдены методом возмущений по малому параметру, характеризующему отношение размеров тела к глубине его начального погружения.

В главном порядке течение жидкости описано линеаризованными уравнениями движе-

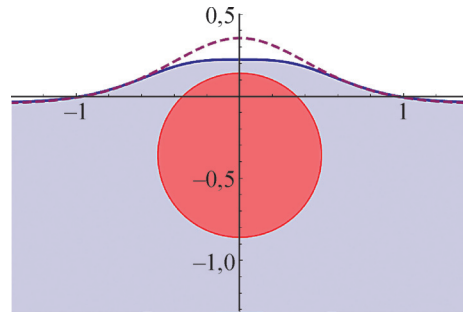


Рис. 22. Вынос инерционного слоя жидкости круговым цилиндром, всплывающим с постоянным ускорением. Штриховая линия – линейная теория, сплошная свободная граница – нелинейное приближение.

ния, а нелинейные эффекты учтены членами более высокого порядка, которые вносят существенную поправку в решение при движении цилиндра вблизи свободной поверхности. Показано, что полученное асимптотическое решение для кругового цилиндра выражается через рациональные функции, а в случае эллиптического – также записывается в элементарных функциях, но при этом включает в себя радикалы.

Программа Ш.22.5. Газо- и термодинамика летательных аппаратов при гиперзвуковых скоростях полета (координатор член-корр. РАН А. Н. Шиплюк)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, в ходе экспериментальных исследований по моделированию полета на аэродинамической установке «Транзит-М» получено существенное снижение сопротивления малогабаритного летательного аппарата с прямоточной силовой установки газогенераторного типа на твердом топливе

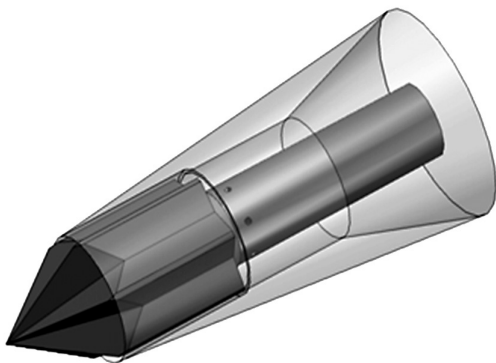


Рис. 23. Модель малогабаритного летательного аппарата (максимальный \varnothing 40 мм).

(рис. 23). Снижение коэффициента сопротивления модели летательного аппарата с $C_x = 0,119$ (режим без горения) до $C_x = 0,022$ (режим с горением) было достигнуто за счет работы встроенной прямоточной силовой установки газогенераторного типа на твердом топливе (рис. 24). Наилучшие результаты получены с образцами топлива на основе калийной селитры и сорби-

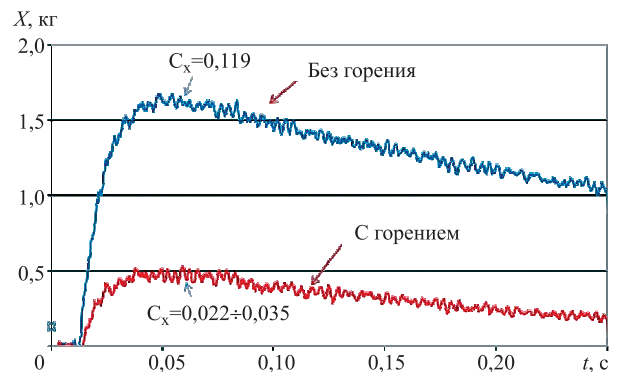


Рис. 24. Сравнение сопротивления модели с работающей и неработающей силовой установкой.

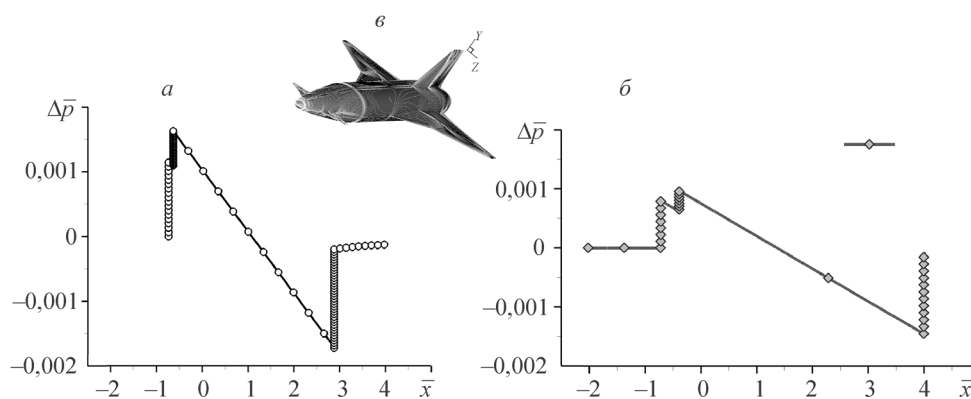


Рис. 25. Профили относительного избыточного давления в дальней зоне тандемной компоновки ($M = 2$, $K = 450$).

a – носовая часть – оживало $\lambda = 4,5$, *б* – носовая часть – модифицированное степенное тело ($\lambda = 4,5$, $n = 0,75$, $r_3 = 0,2$), *в* – общий вид компоновки.

та, обладающими оптимальными физическими характеристиками, но не самой высокой энергетикой.

В том же Институте получено существенное снижение уровня звукового удара (ЗУ) при приемлемой аэродинамической эффективности самолета за счет использования модифицированного степенного тела в качестве носовой части компоновки сверхзвукового пассажирского самолета (СПС), выполненной по тандемной схеме расположения двух крыльев на фюзеляже (рис. 25, в).

На основании сравнения параметров ЗУ, создаваемого СПС заданных веса и длины, компоновки которых выполнены по классической схеме моноплан и нетрадиционной схеме с тандемным расположением двух крыльев на фюзеляже, показано преимущество тандемной

компоновки. Обусловлено это перераспределением возмущенного давления (в виде части подъемной силы) в носовую часть компоновки, что позволяет сохранить эффект средней зоны (дистанция между ударными волнами от фюзеляжа и заднего крыла) и тем самым уменьшить интенсивность звукового удара. В то же время, в силу малой дистанции между ударными волнами наблюдателем на поверхности земли, они воспринимаются как одна волна с интенсивностью, определенной максимальным давлением (рис 25, а). Модифицированное путем затупления носовой части тело позволяет существенно увеличить скорость распространения головной УВ, что обеспечивает увеличение дистанции между ударными волнами и тем самым уменьшение эффективности воздействия волны звукового удара (рис. 25, б).

Программа Ш.22.6. Исследование физических проблем управления до-, сверх- и гиперзвуковыми течениями неравновесных газовых и плазменных сред (координатор докт. физ.-мат. наук А. А. Маслов)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича экспериментально подтверждена возможность использования уравнений, полученных для макроскопических течений, для моделирования газовых микроструй. Для макро- и микроструй впервые показано хорошее качественное и количественное совпадение длин ячеек волновой структуры, величины дальности струй, положений ламинарно-турбулентного перехода и реламинаризации струйного течения при условии равенства чисел Рейнольдса, вычисленных по диаметру сопел и параметрам потока на выходе из сопла. Выполнено экспериментальное ис-

следование газодинамической структуры сверхзвуковых струй азота и воздуха, истекающих из круглых звуковых микросопел в атмосферу и область пониженного давления в широком диапазоне степени нерасчетности n от 1 до 10 (рис. 26).

Для макро- и микроструй впервые показано хорошее качественное и количественное совпадение длин ячеек волновой структуры, величины дальности струй, положений ламинарно-турбулентного перехода и реламинаризации струйного течения при условии равенства чисел Рейнольдса, вычисленных по диаметру сопел и параметрам потока на выходе из сопла. Это по-

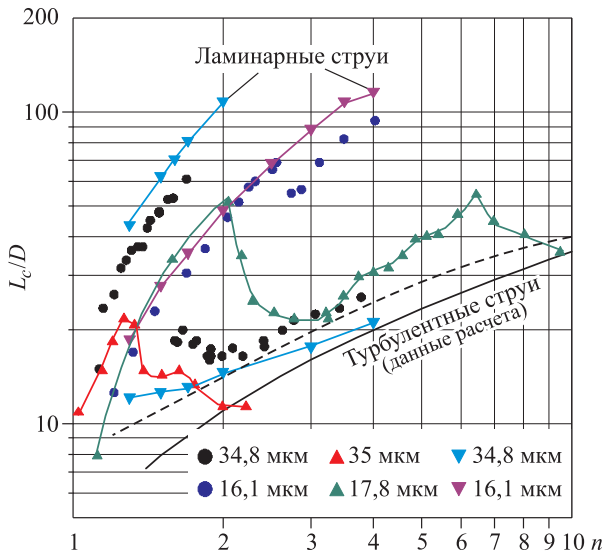


Рис. 26. Расчетные и экспериментальные зависимости относительной длины сверхзвукового участка микроструй L_c/D от величины степени нерасчетности n для различных диаметров микросопел.

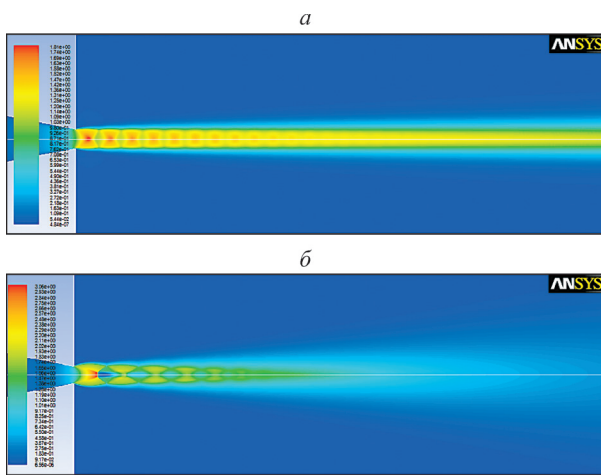


Рис. 27. Ламинарный (а) и турбулентный (б) режимы течения микроструй. Данные численного моделирования.

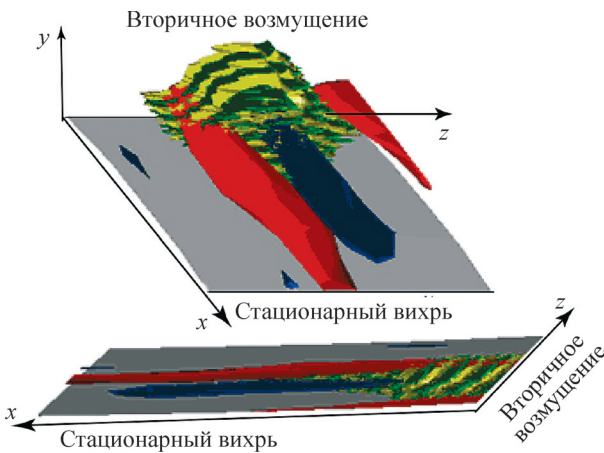


Рис. 28. Иповерхности стационарного вихря и вторичных возмущений в двух ракурсах.

зволило использовать пакет ANSYS Fluent, основанный на уравнениях для макротечений, для численного моделирования микроструй. Сопоставление данных экспериментальных и расчетных зависимостей относительной дальности микроструй L_c/D от величины степени нерасчетности n в ламинарном и турбулентном режимах течения для ряда микросопел приводится на рис. 26. Приведены примеры численного моделирования полей чисел Маха для нерасчетных струй при ламинарном (рис. 27, а) и турбулентном (рис. 27, б) режимах течения. Результаты этих исследований показывают возможность применения уравнений, полученных ранее для макроскопических течений, для моделирования газовых микроструй.

В этом же Институте выполнен цикл работ по экспериментальному исследованию ламинарно-турбулентного перехода на стреловидных крыльях, обычно имеющего место в области благоприятного градиента давления. Большинство современных летательных аппаратов используют стреловидные крылья. Впервые в мире получены качественные и количественные результаты по развитию вторичной высокочастотной неустойчивости стационарного вихря, генерированного элементом шероховатости, в области благоприятного градиента давления (область передней кромки) на модели скользящего крыла (рис. 28).

Установлена область максимальной восприимчивости стационарного вихря, где наблюдается максимальный рост вторичных возмущений, приводящих к переходу, в зависимости от расположения элемента шероховатости (рис. 29).

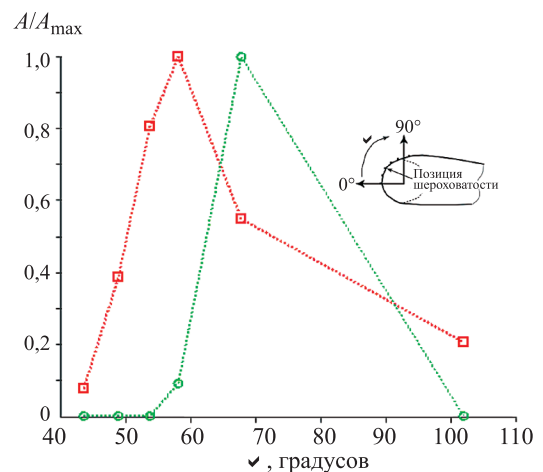


Рис. 29. Интегральные характеристики амплитуды стационарных (красным) и вторичных (зеленым) возмущений при различных расположениях шероховатости.

Программа Ш.22.7. Волновые явления и турбулентность в многофазных и реагирующих потоках (координатор член-корр. РАН Д. М. Маркович)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаедадзе экспериментально и численно изучены закономерности динамики распада широкого класса жидкостей при высокой внешней плотности энергии. С этой целью выполнен комплекс экспериментальных исследований распада воды, метилового спирта, изопропилового спирта и этиленгликоля в области глубокой метастабильности при скоростях роста температуры до 800 МК/с. Выбор жидкостей обусловлен широким диапазоном начальной вязкости, которая изменялась при нормальных условиях до 40 раз, изменением давления насыщенных паров от 40 до 150 бар, различным смачиванием жидкостями поверхности нагрева. Впервые установлено,

что для всех жидкостей имеет место предельная скорость изменения температуры, при которой пузырьковое разделение фаз переходит в принципиально другой механизм ударного разделения фаз, с образованием сплошной пленки пара, минуя стадию пузырькового распада жидкости (рис. 30, а). Ударное разделение фаз (рис. 30, б) обусловлено заходом жидкости в область неустойчивых состояний из-за существенного превышения подводимой к жидкости тепловой энергии над теплотой, затрачиваемой на образование новой фазы.

В этом же Институте проведено экспериментальное и численное исследование распределения тепловых и диффузионных потоков на

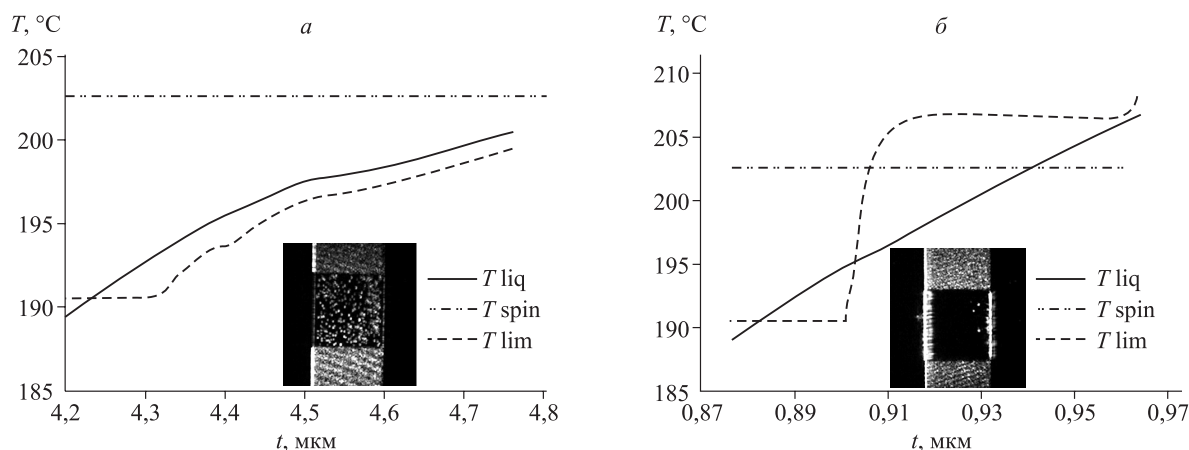


Рис. 30. Фотографии распада изопропилового спирта и численный расчет температуры жидкости.

а – пузырьковый распад при скорости роста температуры $dt/dt = 32,3$ МК/с и тепловом потоке на границе нагреватель–жидкость $q_w = 50$ МВт/м², б – ударный распад при $dt/dt = 252$ МК/с и $q_w = 133$ МВт/м².

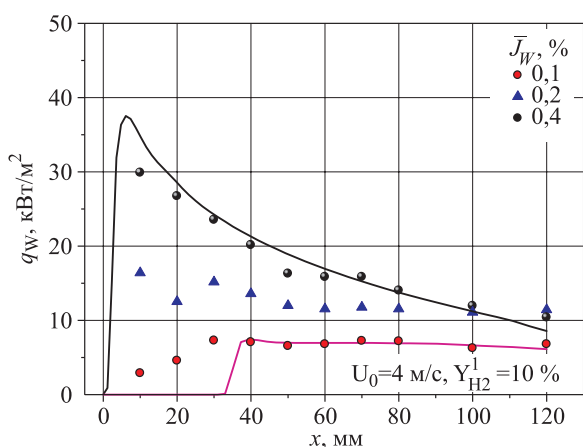


Рис. 31. Распределение теплового потока вдоль пластины при горении и различной величине вдува $J_w = (\rho v)_w / \rho_0 U_0$ в пограничном слое. Точки – экспериментальные данные, линии – результаты численного моделирования.

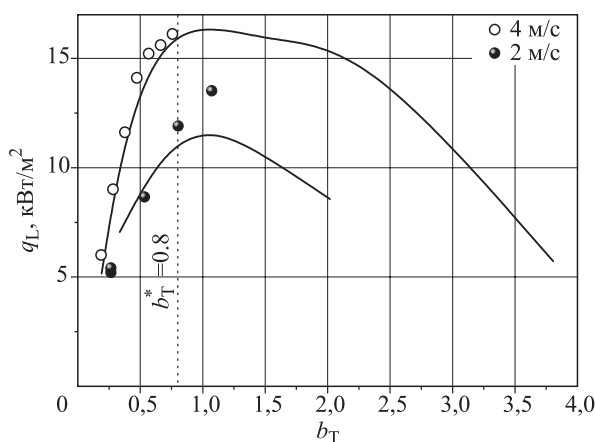


Рис. 32. Зависимость среднего по пластине теплового потока от интенсивности вдува. Точки – экспериментальные данные, линии – результаты численного моделирования, вертикальный пунктир – аналитическая оценка по предложенной методике.

стенке в зависимости от интенсивности вдува как при горении, так и без него. Впервые показано, что при наличии равномерного вдува в распределении теплового и диффузионного потоков вдоль пластины имеется максимум: как в случае потока с горением (рис. 31), так и без него. Наличие экстремума в характеристиках теплообмена объясняется малой толщиной пограничного слоя и, как следствие, слабым перемешиванием в начале пластины и оттеснением слоя за счет вдува в ее конце. При анализе средних тепловых потоков на пористой поверх-

ности при горении в пограничном слое впервые установлено, что в зависимости от интенсивности вдува также имеется максимум (рис. 32). Он обусловлен нестабильностью (или полным отсутствием) горения при малых степенях вдува и оттеснением пограничного слоя от пластины при больших. На основе этих результатов предложен инженерный метод анализа тепловых и диффузионных потоков на проницаемой поверхности в реагирующем и не реагирующем потоке, который позволяет оценить как положение, так и величины их максимальных значений.

Программа Ш.22.8. Неравновесные процессы в разреженном газе и плазме (координатор акад. А. К. Ребров)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе проведен комплекс теоретических исследований явления формирования различных пылевых структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока, построены самосогласованные модели параметров плазмы разряда и пылевых частиц, представлен и промоделирован возможный механизм формирования области без пылевых частиц (войдов) на оси разрядной трубки в условиях микрогравитации. Разработана самосогласованная модель положительного столба тлеющего разряда постоянного тока с пылевыми частицами для радиальных распределений параметров плазмы разряда и пылевой компоненты в аксиально однородном тлеющем разряде. Было учтено влияние силы ионного увлечения (ионный дрэг) на пылевую частицу и показано, что если сила ионного дрэга превос-

ходила электростатическую силу в центральной части разрядной трубки, там формировалась область, свободная от пылевых частиц, – образовывался войд (рис. 33, 34). Этим подтверждаются зарубежные экспериментальные данные, полученные в условиях микрогравитации.

Полученные результаты имеют фундаментальное теоретическое значение для описания процессов самоорганизации пылевых структур в разрядной плазме и могут быть использованы в целом ряде практических приложений, таких как применение технологий плазменного напыления в микроэлектронике, в различных плазмохимических технологиях при производстве тонких пленок и покрытий, синтезе наночастиц.

В этом же Институте впервые из смеси моносилана с водородом синтезированы ориентированные массивы пучков («микрочана-

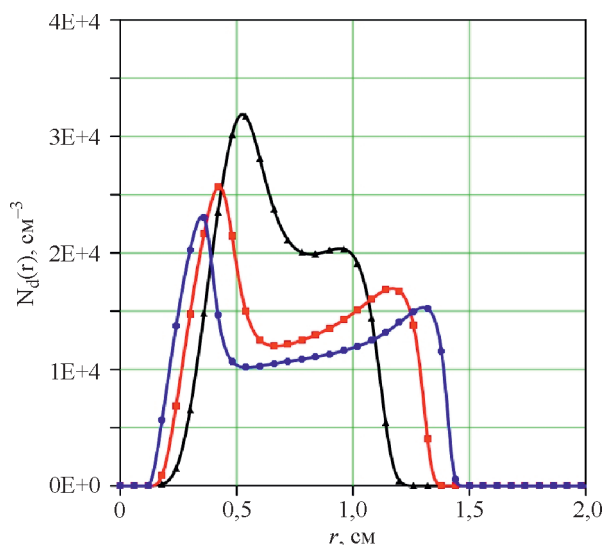


Рис. 33. Радиальное распределение плотности пылевых частиц в DC-разряде при различных радиусах пылевых частиц (на оси частиц нет – «войда»).

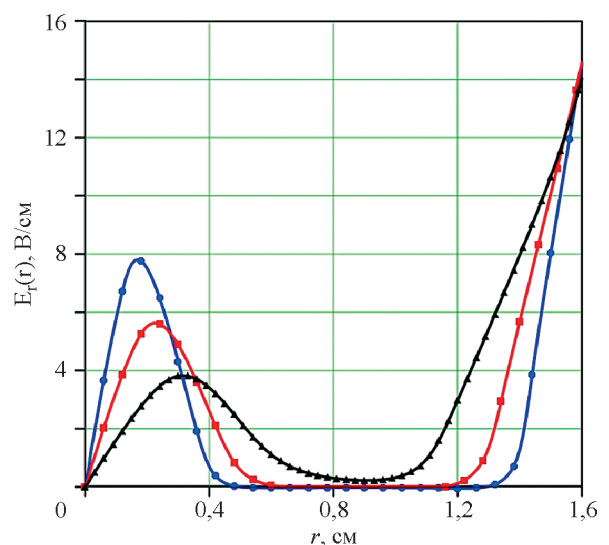


Рис. 34. Радиальная компонента электрического поля выталкивается из пылевого облака.

тов») нанопроволок оксида кремния методом газоструйного химического осаждения с активацией электронно-пучковой плазмой (рис. 35). Синтез осуществлялся на подложках монокристаллического кремния, покрытых частицами оловянного катализатора микронного размера, из которых вырастают пучки нанопроволок окиси кремния, каждая из которых имеет диаметр примерно 15 нм.

Синтез осуществляется по известному механизму «пар–жидкость–кристалл», при этом скорость роста микроканалов при температуре синтеза 400 °С составляет около 25 нм/с. Атомы кремния поступают из струи, активированной электронно-пучковой плазмой, а атомы кислорода – из атмосферы вакуумной камеры. Направленный рост осуществляется из-за воздействия направленного потока плазмы, приводящего к неравномерному нагреву частицы катализатора. Такая модель роста ориентированных массивов нанопроволок окиси кремния реализована впер-

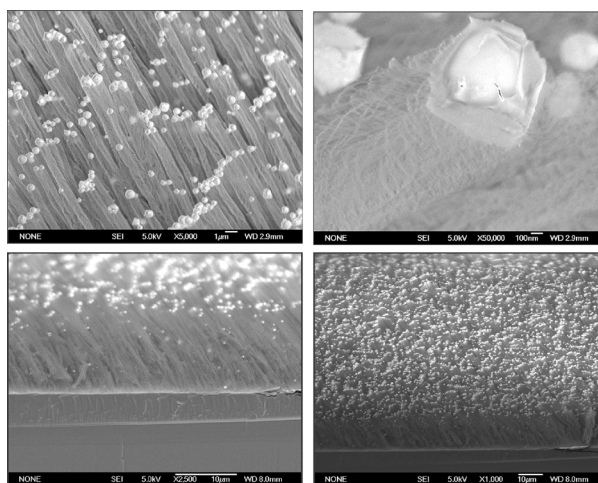


Рис. 35. Изображения синтезированных наноструктур, полученные с помощью СЭМ.

вые. Метод перспективен для синтеза нанопроволок при изготовлении солнечных элементов, оптоэлектронных устройств и т. д.