

## 6. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### Программа 6.1. Системный анализ и обоснование развития энергетики и энергоэффективных технологий, управление системами энергетики

В Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева впервые решена задача координации противоаварийного управления потребителями и устройствами FACTS (рис. 1). До сих пор в аварийных условиях в ЭЭС в случае необходимости разгрузки ЛЭП с целью недопущения развития аварии использовалось отключение потребителей на время ликвидации аварии, что связано с экономическими ущербами у потребителей. Применение устройств FACTS на разгружаемых ЛЭП позволяет повысить эффективность использования пропускной способности этих ЛЭП и тем самым снизить объем аварийно отключаемых потребителей. В процессе координации противоаварийного управления за счет этого минимизируется суммарный ущерб аварийно отключаемых потребителей при сохранении эффективности противоаварийного управления ЭЭС в целом. Выполнены тестовые расчеты для сложной схемы ЭЭС, иллюстрирующие эффективность разработанной технологии ко-

ординированного противоаварийного управления ЭЭС (рис. 2).

В том же Институте выполнен термодинамический анализ режимов паровоздушной газификации низкосортных топлив в широком диапазоне условий ведения процесса. Показано, что режимы, представляющие практический интерес, располагаются в относительно узкой области пространства условий реакции. При этом реализованные в действующих установках режимы группируются лишь в небольшой части этой области (рис. 3). Получено термодинамическое объяснение низкой устойчивости состава генераторного газа по ходу процесса газификации, составляющей проблему в технологиях силовой газификации и влекущей увеличение стоимости установок. В области допустимых режимов адиабатическая температура процесса претерпевает резкий рост с увеличением количества окислителя в системе. Таким образом, небольшие вариации качества топлива или параметров дутья могут

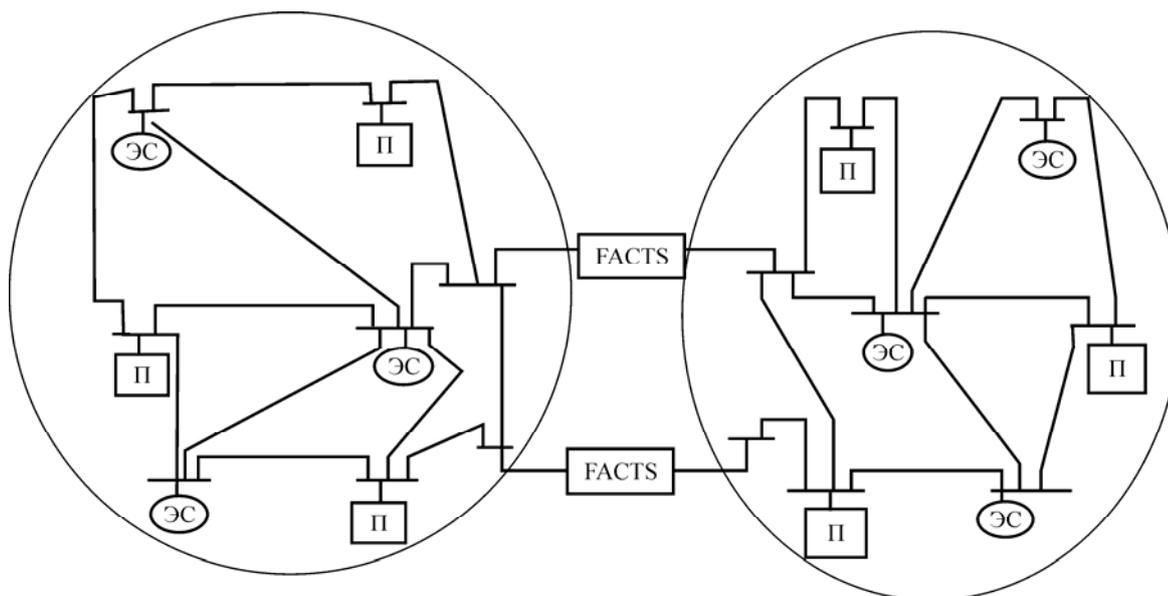
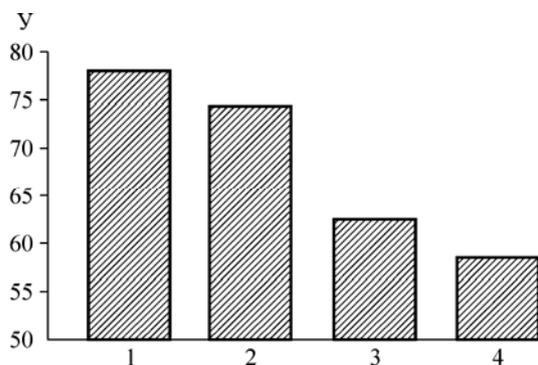


Рис. 1. Принципиальная схема применения устройств FACTS: ЭС — электростанция; П — потребитель; FACTS — гибкая система передачи переменного тока.

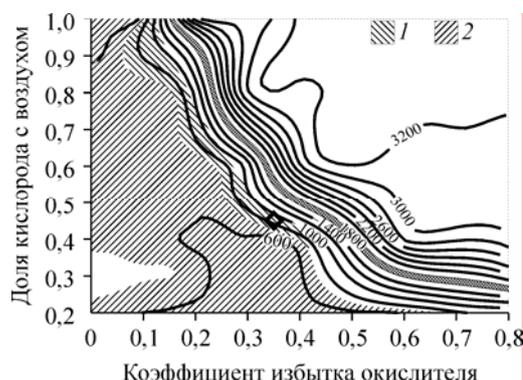
Fig. 1. A schematic diagram of FACTS application: ЭС — power plant; П — consumer, FACTS — Flexible Alternative Current Transmission System.



**Рис. 2.** Относительный ущерб потребителей от аварийного отключения:  $Y$  — ущерб потребителей; 1 — при отсутствии устройств FACTS; 2 — одно устройство FACTS 1-го типа; 3 — одно устройство FACTS 2-го типа; 4 — два устройства FACTS 2-го типа.

**Fig. 2.** Relative outage damage caused to consumer:  $Y$  — damage of customers; 1 — no FACTS; 2 — one FACTS-device (Type I); 3 — one FACTS-device (Type II); 4 — two FACTS-devices (Type II).

приводить к резкому изменению термического режима процесса и, соответственно, существенным колебаниям состава получаемого синтез-газа и его калорийности. Из полученных расчетных данных следует, что повышение качества синтез-газа и улучшение эксплуата-



**Рис. 3.** Изолинии адиабатической температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) паровоздушной газификации: 1 — область традиционных процессов; 2 — «неудобный» диапазон условий.

**Fig. 3.** Isolines of the adiabatic temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) of the air-steam gasification: 1 — field of traditional processes; 2 — a «inconvenient» range of requirements.

ционных характеристик технологий силовой газификации возможно путем перехода в область ранее не исследованных режимов реакции. Один из перспективных режимов апробирован экспериментально на лабораторной установке газификации.

### Программа 6.2. Теплофизические основы создания новых технологий для промышленной, альтернативной теплоэнергетики и энергоресурсосбережения

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе предложен новый подход к созданию материалов с отрицательным или близким к нулю коэффициентом теплового расширения, который основан на межфазном перераспределении компонентов сплавов. Впервые экспериментально показано наличие явления отрицательного теплового расширения в эвтектическом сплаве висмут—свинец (рис. 4). Разработаны методы регулирования абсолютной величины коэффициента термического расширения в двухфазных материалах. Выполненные исследования открывают принципиально новые возможности в создании функциональных материалов, которые могут найти самые разнообразные применения в науке и технике, а также важны для обеспечения безопасной эксплуатации ядерных реакторов, использующих многокомпонентные жидкометаллические теплоносители.

В том же Институте разработана установка для обеззараживания воды производительностью 10—20 м<sup>3</sup>/ч (рис. 5). Уникальность установки заключается в применении индукционной ультрафиолетовой лампы мощностью 200 Вт, основным достоинством которой является большой ресурс работы — более 60 тыс. ч, что в шесть—восемь раз превышает ресурс обычных электродных УФ-ламп. За счет отсутствия электродов, применения амальгамы ртути, оптимизации давления паров ртути и плотности тока в индукционном разряде выход УФ-излучения на резонансной линии ртути 253 нм доведен до 35 % от подводимой электрической мощности.

Предсказана и обнаружена новая вихревая структура — винтовой диполь. Впервые решение для винтовой вихревой нити с равномерным распределением особенностей дипольного

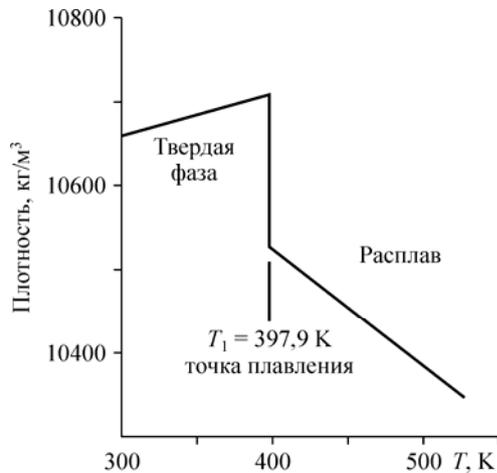


Рис. 4. Температурные зависимости плотности эвтектики висмут—свинец в твердом и жидком состояниях.

Fig. 4. Temperature dependencies of density of the bismuth-lead eutectic in solid and liquid states.

типа было получено в аналитически замкнутой форме, подобно хорошо известному решению для плоского диполя. Одновременно подобная вихревая структура была найдена в модельной камере сгорания с помощью лазерно-доплеровского анемометра и техники фазового осреднения. Результат важен как для вихревой гидромеханики, так и для тех областей естественного возникновения, где понятие вихря (ротора) имеет первостепенное значение.

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаедала разработаны новые высокоэффективные вихревые аппараты, предназначенные для очистки газов на промышленных предприятиях и на энергетических объектах:

Циклон, предназначенный для снижения пылевой нагрузки на рукавный фильтр при производстве таблеток из диоксида урана (рис. 6). Устройство внедрено на Новосибирском заводе химконцентратов.

Вихревой скруббер для улавливания золы в системах очистки дымовых газов на тепловых станциях (рис. 7).

Золоуловитель, включающий батарею из восьми вихревых скрубберов производительностью по газу 50 000 м<sup>3</sup>/ч каждый, внедрен на Новосибирской ТЭЦ-4.

Вихревой скруббер для очистки воздуха от диоксида азота. Устройство внедрено на Новосибирском заводе химконцентратов.

Эффективность циклонов доведена до 99,6%. В вихревых скрубберах решены проблемы каплеуноса и снижено гидравлическое сопротивление. Вихревые скрубберы подобной

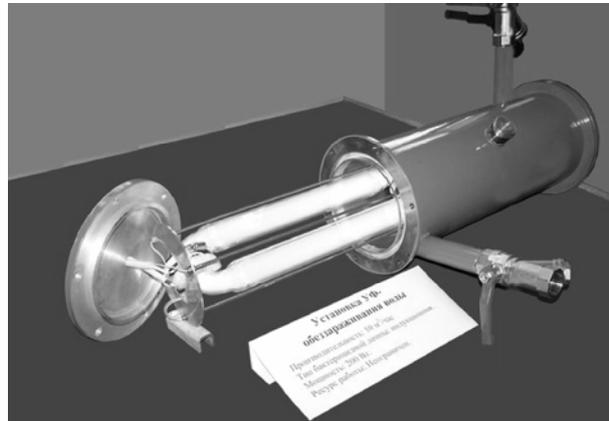


Рис. 5. Установка УФ-обеззараживания воды на индукционной лампе.

Fig. 5. UV installation for water decontamination based on an induction lamp.

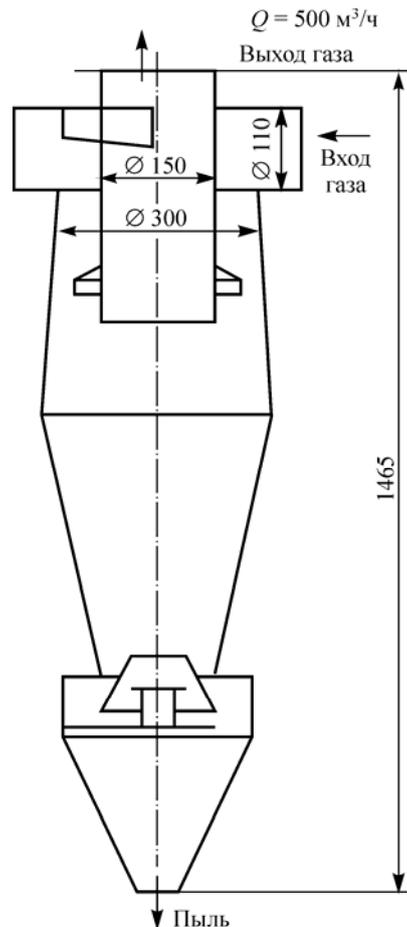
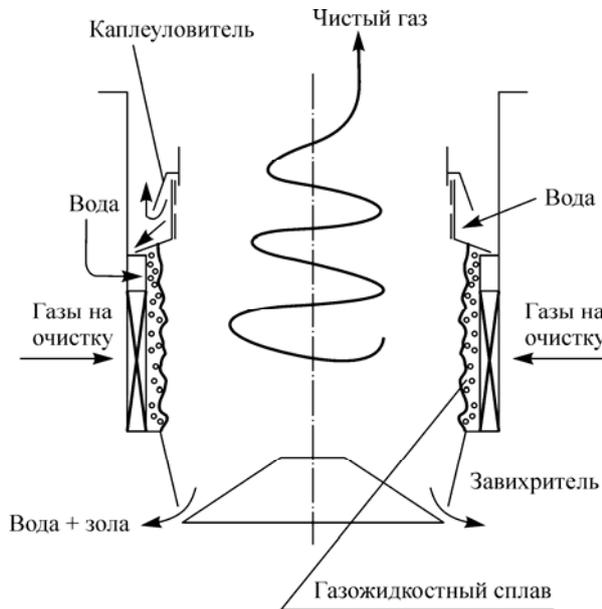


Рис. 6. Устройство циклона для улавливания частиц диоксида урана.

Fig. 6. The scheme of a cyclone for catching particles of uranium dioxide.



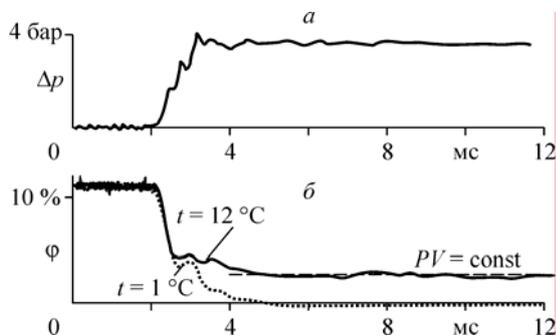
**Рис. 7.** Устройство вихревого скруббера для улавливания золы в системах очистки дымовых газов на тепловых станциях.

**Fig. 7.** The scheme of a vortex scrubber for catching ash in cleaning systems of flue gas on heat generation stations.

конструкции могут быть использованы для улавливания фтористого водорода, хлора, аммиака, фосгена, очистки воздуха от пыли при различной производительности по газу.

### Программа 6.3. Тепломассоперенос в многофазных и пористых средах при фазовых переходах и химических реакциях

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаедадзе с целью создания высокоскоростного метода получения гидратов газов проведено экспериментальное исследование процесса образования гидратов газов за ударной волной в воде с пузырьками газа. Эксперименты выполнены на вертикальной ударной трубе, заполненной газожидкостной смесью. В верхней части графика на рис. 8 показан временной профиль волны давления в воде с пузырьками

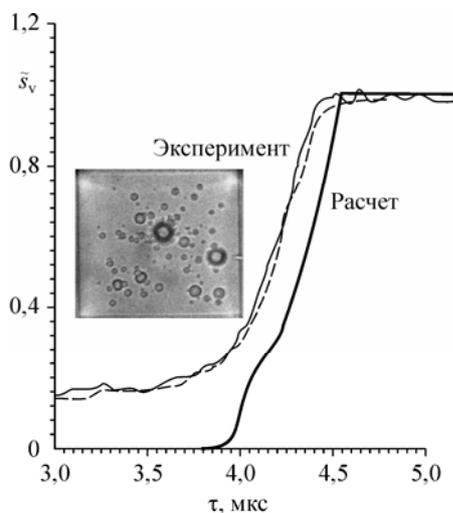


**Рис. 8.** Профили волны давления в воде с пузырьками газа (а) и объемного газосодержания за фронтом ударной волны (б).

**Fig. 8.** Profiles of the pressure wave in the water with gas bubbles (а) and the volumetric gas content behind the shock wave (б).

фреона-12 при атмосферном давлении, а под ним — профили объемного газосодержания за фронтом ударной волны для двух температур смеси. При температуре выше критической температуры образования газогидратов фреона-12 ( $t = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$  — сплошная линия) происходит дробление и изотермическое сжатие газовых пузырьков за ударной волной, что соответствует закону сжатия газовой фазы  $PV = \text{const}$  (штриховая линия). При температуре ниже критической ( $t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  — пунктирная линия) уже через 3 мс за фронтом ударной волны объемное газосодержание равно практически нулю, что соответствует переходу газовой фазы в газогидратное состояние. Визуализация процесса за ударной волной подтверждает переход газа в газогидратное состояние. Таким образом, ударно-волновое воздействие на газоземную смесь позволяет на один—два порядка увеличить скорость образования газогидратов по сравнению с существующими методами.

Изучен механизм интенсивного импульсного кипения жидкости в условиях глубокой метастабильности, когда высокие локальные перегревы приводят к спонтанному зародышеобразованию. Теоретически и экспериментально получено, что в области интенсивного фа-

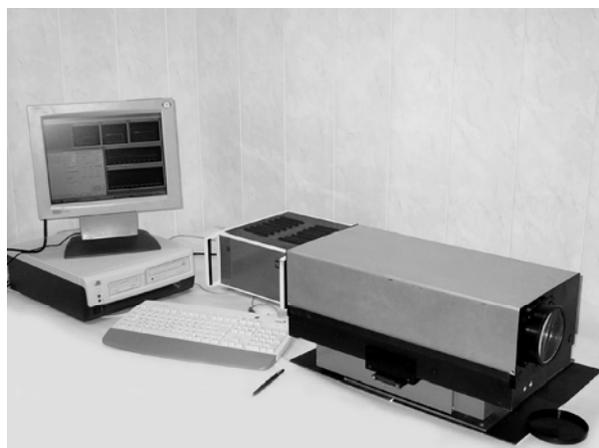


**Рис. 9.** Зависимость от времени доли поверхности нагревателя, занятой паровой фазой, при пузырьковом распаде воды в эксперименте и в расчете.

**Fig. 9.** Time dependence of the heater part occupied by the vapor phase at the bubble breakdown of the water in experiment and calculation.

зового перехода генерация акустической энергии растущими пузырями снижает поток зародышеобразования вплоть до полного его прекращения. Впервые показано, что акустическое взаимодействие пузырьков радикально влияет на динамику вскипания и его учет имеет принципиальное значение в теории пузырькового распада жидкости в зоне глубокой метастабильности (рис. 9). Установлено, что пузырьковый распад жидкости в этой зоне имеет пороговый характер. Построенная теория расширяет фундаментальные основы физики фазовых переходов. Выполненные исследования открывают новые возможности для создания широкого спектра микроэлектронно-механических систем, основанных на эффекте взрывного вскипания.

Впервые разработана новая анаморфотная схема лазерного анемометра, позволившая применить современные мощные полупровод-



**Рис. 10.** Внешний вид лазерного доплеровского анемометра ЛАД-05 ЛМЗ.

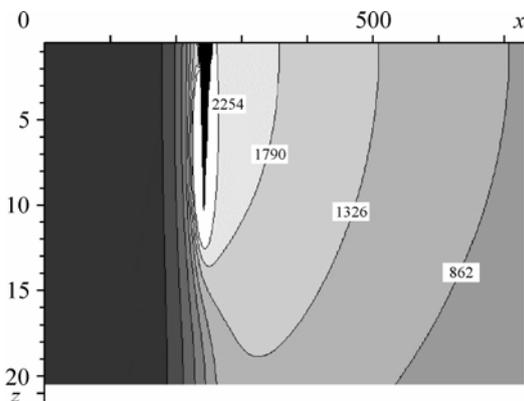
**Fig. 10.** The view of Laser Doppler Anemometer LAD-05 LMZ.

никовые лазеры и, несмотря на низкую степень их пространственной и временной когерентности, существенно улучшить характеристики анемометра. Созданы встроенная система обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур «Field Programmable Gate Array» и новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Проведен полный цикл НИОКР, выпущена конструкторская документация, созданы опытные образцы, подготовлена возможность выпуска малой серии. Основные параметры разработанного анемометра ЛАД-05 ЛМЗ (рис. 10) соответствуют лучшим мировым аналогам (DANTEC, TSI) при существенно меньших габаритах и стоимости. Измеритель внедрен на крупнейшем предприятии отечественного гидротурбостроения ОАО «ЛМЗ» для оптимизации характеристик и повышения безопасности гидротурбин.

#### **Программа 6.4. Физико-химические основы динамики и энергетика слабоионизованного газа и методы воздействия на вещество**

В Институте теоретической и прикладной механики построена физико-математическая модель лазерной сварки многокомпонентных сплавов на основе алюминия. Модель базиру-

ется на квазиравновесном описании процессов плавления и кристаллизации многокомпонентных сплавов с образованием двухфазной зоны, которая не содержит переохлажденной жидко-



**Рис. 11.** Изолинии температуры в окрестности парогазового канала (темная область на фоне светлой) при сварке встык двух пластин из алюминиевого сплава (90 % Al + 10 % Si, по массе). Мощность излучения 4 кВт, радиус луча 100 мкм, скорость сварки 8,3 см/с, толщина пластин 2 мм, глубина парового канала 1 мм. Масштаб указан в радиусах луча, температура — в градусах Кельвина.

**Fig. 11.** Isolines of temperature in a neighbourhood of the steam-gaseous channel (dark area on a phon light) at welding in the junction of two plates from an aluminum alloy (90 % Al + 10 % Si, on mass). Power of radiation of 4 kW, radius of a beam 100 microns, velocity of welding 8.3 cm/s, width of plates of 2 mm, depth of the steam channel of 1 mm. Gauge is indicated in radiuses of a beam, temperature — in degrees of a Kelvin.

сти или перегретой твердой фазы. Между незатвердевшим расплавом и выделившимися из него кристаллами существует термодинамическое равновесие. Установлено, что вследствие малой диффузионной подвижности растворенных компонентов в твердом состоянии распределение вещества в растущих кристаллах неоднородно и полное равновесие в системе не достигается. Расчеты показали, что осуществ-

вить глубокое плавление при сварке алюминиевых пластин невозможно без образования парогазовой каверны. Поэтому особое внимание уделено описанию механизма сварки в режиме кинжального проплавления, когда плотность мощности излучения превышает пороговое значение и процесс формирования соединения сопровождается интенсивным испарением материала с образованием парового канала (рис. 11). Модель позволила рассчитать кристаллизацию многокомпонентного сплава, ширину двухфазной зоны, время пребывания металла в ней, а также возможность образования газоусадочной пористости, размер кристаллического зерна и пор.

Экспериментальная проверка модели осуществлялась на образцах сварных соединений углеродистой, нержавеющей сталей, титана, алюминия и его сплава марки 1420Т авиационного назначения. Совместно с Институтом машиноведения УрО РАН методами металлографии, электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа исследованы микроструктура, фазовый и химический состав полученных образцов, что позволило проводить сравнение не только их интегральных, но и локальных характеристик.

В том же Институте впервые установлено влияние коронного разряда на катодный слой и предельные характеристики объемного тлеющего разряда, влажности — на предельные токи тлеющего разряда. Используя экспериментальные данные, впервые создан компактный макет лазера на новом принципе организации потока, основанном на использовании дискового вентилятора — теплообменника (рис. 12).



**Рис. 12.** Внешний вид лазера и роторов дисковых вентиляторов.

**Fig. 12.** Appearance of the laser and rotors of disk fans.

### Программа 6.5. Физико-химическая механика гетерогенных сред и технологии на их основе

Современные методы измерения характеристик высокоскоростных потоков, основанные на применении тонких (2—5 мкм) нагретых нитей в настоящее время себя практически исчерпали. Назрела необходимость существенного (в 10—100 раз) увеличения частотного диапазона измеряемых сигналов. В совместной работе Института теоретической и прикладной механики и Института физики полупроводников на основе нанотехнологии создан новый тип не имеющего аналогов в мире датчика термоанемометра — трубчатый (рис. 13). Чувствительный элемент датчика представляет собой полупроводниковую монокристаллическую микро- или нанотрубку с наружным диаметром 0,1—10 мкм и толщиной стенки 1—100 нм, на внутреннюю или наружную поверхность которой нанесен чувствительный слой электропроводного материала. Технология Института физики полупроводников изготовления таких трубок отмечена Медалью РАН для молодых ученых. Постоянная времени нового датчика почти в 100 раз меньше (рис. 14), чем у традиционных термоанемометрических датчиков. Сравнительные измерения

пульсаций скорости в турбулентном пограничном слое подтвердили большую чувствительность нового трубчатого датчика по сравнению с традиционными датчиками и увеличение частотного диапазона в 100 раз без дополнительной компенсации тепловой инерции датчика.

В Институте теоретической и прикладной механики создан новый класс термобарьерных плазменных покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками (пористость, адгезия, когезия и т. д.) на основе полученных металлических порошков, модифицированных наночастицами тугоплавких соединений (карбидов, боридов, оксидов). Показано, что значения деформаций, при которых наблюдается отслоение покрытий непосредственно после напыления, для стандартного образца составляет 0,5 %, а для образцов, прошедших механоактивацию и модификацию ультрадисперсными частицами, — 2 %, т. е. такие образцы обладают в четыре раза более высокой прочностью связи по сравнению со стандартными образцами.

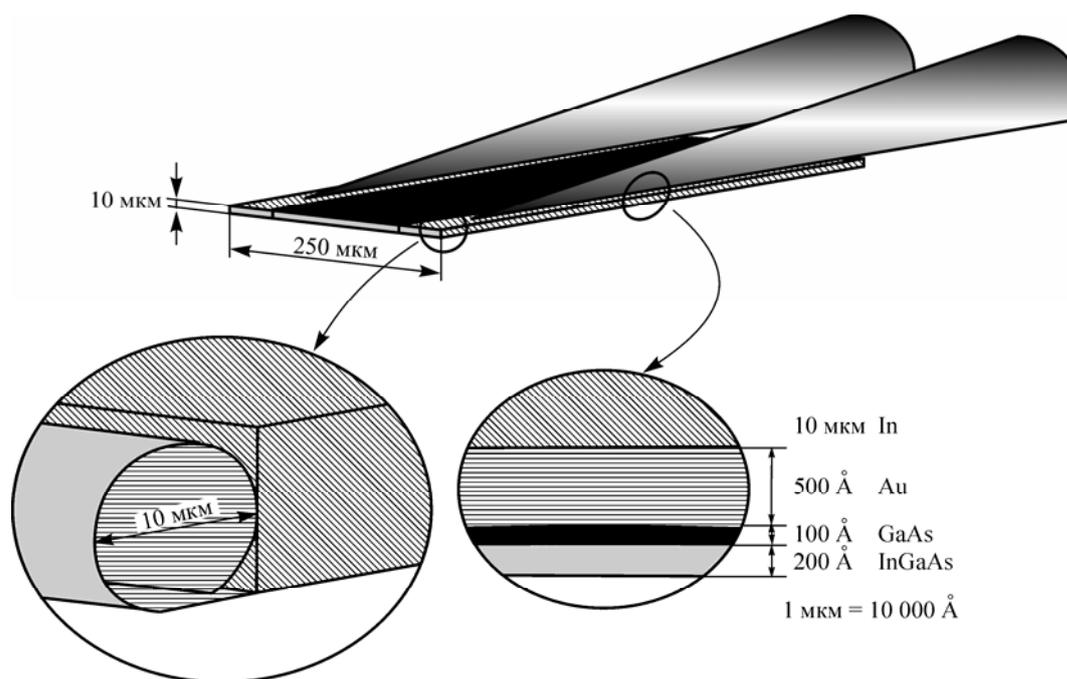
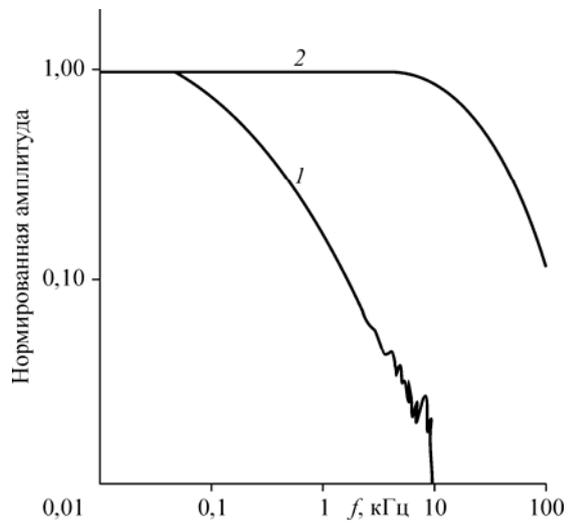


Рис. 13. Трубчатый датчик термоанемометра.

Fig. 13. The tubular thermoanemometer gauge.



**Рис. 14.** Частотные характеристики датчиков: 1 — традиционного проволочного, 2 — трубчатого. Частотный диапазон датчика расширен более чем в 100 раз.

**Fig. 14.** Frequency characteristics of gauges: 1 — traditional wire, 2 — tubular. Frequency the range of the gauge is expanded more than in 100 times.