

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 3.2. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ; ТЕПЛОМАССОБМЕН, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА И ТЕХНОЛОГИИ НА ЕЕ ОСНОВЕ

Программа 3.2.1. Теплофизические основы экологически чистых и ресурсосберегающих систем производства, передачи и трансформации тепловой энергии (координаторы член-корр. РАН С. В. Алексеенко, докт. техн. наук А. П. Бурдуков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе методом просвечивания образцов узким пучком монохроматического гамма-излучения исследованы фазовые равновесия жидкость—пар для гексафторбензола, пентафторбензола, перфторгексана, перфтороктана, 1,1,1,2,3,3,3-гептафторпропана и 1,1,1,2,3,3-гексафторпропана, а также фазовые равновесия жидкость—жидкость для систем гексан—перфторгексан, гептан—перфторгексан, висмут—цинк, индий—алюминий, медь—свинец, висмут—галлий и свинец—галлий. Измерения проведены вплоть до приведенной температуры $\varepsilon \sim 10^{-4}$ ($\varepsilon = 1 - T/T_{кр}$, где $T_{кр}$ — критическая температура). Получены новые надежные экспериментальные данные по форме линий равновесия жидкость—пар в координатах плотность—температура и линий равновесия жидкость—жидкость в координатах мольная концентрация—температура, с высокой точностью определены координаты критических точек испарения и расслоения и критические индексы β кривых сосуществования. В целом, экспериментальные критические индексы оказались близки к теоретическому значению критического показателя для модели Изинга. Влияния характера межатомного взаимодействия на величину критического показателя не обнаружено. Однако установлена четкая корреляция между значением критического показателя кривой сосуществования и типом критической точки. Средняя величина β для расслаивающихся жидких металлических и органических систем (равновесие жидкость—жидкость) составляет 0,315, а для линий равновесия жидкость—пар среднее значение $\beta = 0,345$. Таким образом, полученные результаты указывают на существование противоречия между экспериментом и флуктуационной теорией критических явлений (скейлинг), которая предска-

зывает универсальность критических индексов для систем с одинаковой размерностью параметра порядка.

В том же Институте совместно с ООО «ТеплоПром» разработана пневматическая форсунка, предназначенная для распыливания любых жидких продуктов (в том числе, суспензий). В частности, она может быть использована в технологии сжигания жидких топлив, включая водоугольное топливо (ВУТ), в котлах малой и большой промэнергетики. Принцип работы форсунки основан на использовании эффекта Коанда (рис. 4) и кумулятивных струй. Форсунка обеспечивает высокую дисперсность распыливания, возможность одновременного использования нескольких разных видов топлива: дизельное топливо, ВУТ и др. Главное преимущество заключается в практическом отсутствии абразивного износа при распыливании суспензий, и поэтому форсунка имеет длительный ресурс работы (до 2000 ч). Разработанная форсунка прошла промышленные испытания в течение двух лет на Заводе стеновых блоков (г. Новосибирск) в опытно-промышленных котлах типа КЕ 10-13, переоборудованных на сжигание ВУТ. Получен патент РФ № 2346756.

Институтом теплофизики им. С. С. Кутателадзе совместно с Датским техническим университетом впервые выявлена возможность образования вихревых мультиплетов в центральной части интенсивно закрученного потока жидкости, генерируемого в цилиндрической полости ее вращающимся торцом. Эти когерентные вихревые структуры обнаружены для больших, чем исследовались ранее, удлинений цилиндра. Исследование поля завихренности вместо поля скорости позволило более четко идентифицировать возникающую вихревую структуру, установить начало отклонения от

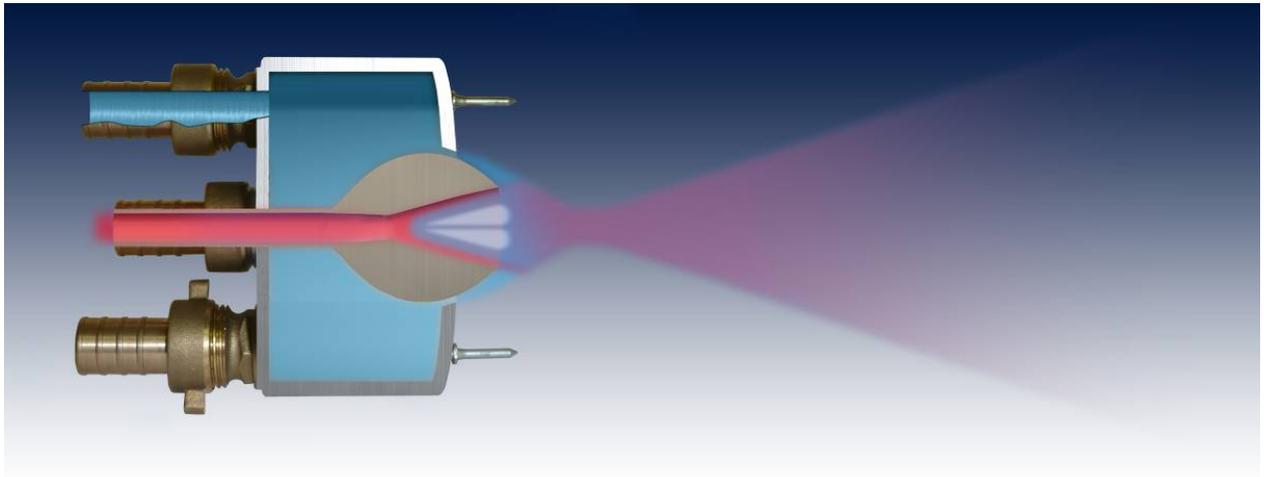


Рис. 4. Схема пневматической форсунки. Топливо подается по центральному каналу, воздух идет по периферии.

осесимметричного режима течения и найти границу перехода к режимам течения с равномерно вращающимися мультиплетами. Все четыре изображения (рис. 5) хорошо выделяют разные типы регулярных равномерно вращающихся вихревых мультиплетов: 1 — простой триплет; 2 — двойной триплет; 3 — двойной дуплет; 4 — одиночный квадруплет. Светлый цвет соответствует положительному отклонению значений завихренности от осесимметричного гауссова распределения, а темный — отрицательному. Двойные триплеты и дуплеты (изображения 2 и 3) состоят из внешних вихрей положительной циркуляции и из отрицательных

внутренних вихрей. Дополнительные исследования, проведенные визуализацией мелкими воздушными пузырьками и восстановлением поля скорости стереосистемой (3D PIV), подтвердили винтообразный характер структур. Вопрос о структуре равновесных когерентных вихревых образований имеет принципиальное значение как для развития вихревой концепции теории турбулентности, так и для описания и понимания сложных процессов, происходящих в интенсивно закрученных потоках различного рода вихревых установок и аппаратах.

В Институте физико-технических проблем Севера разработана новая термодинами-

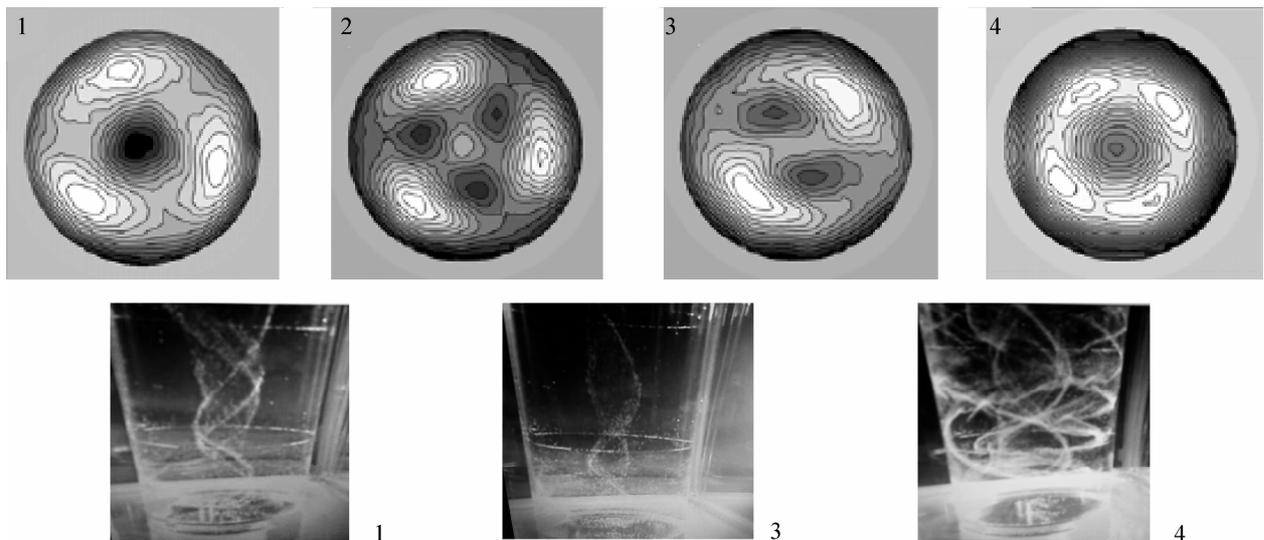


Рис. 5. Виды вихревых мультиплетов.

Верхний ряд — горизонтальное сечение, где показано отклонение от осесимметричного режима (типы 1, 2, 3, 4). Во втором ряду визуализация вихрей (типы 1, 3, 4). Цифры на рисунках означают типы вихрей.

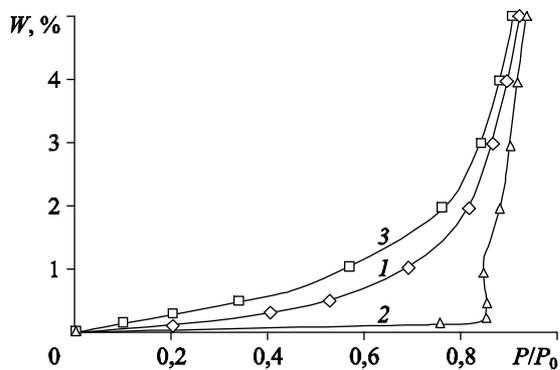


Рис. 6. Изотерма адсорбции при $T = 293$ К и $M_{sc} = 4000$ г/моль.

1 — $\bar{H}_{max}^E = 0$ (идеальная система); 2 — $\bar{H}_{max}^E = 1300$ Дж/моль; 3 — $\bar{H}_{max}^E = -1200$ Дж/моль. P/P_0 — относительное давление равновесного пара; M_{sc} — эффективная молярная масса твердого скелета горной породы; \bar{H}_{max}^E — энергетический параметр взаимодействия твердого скелета и поровой воды.

ческая модель горной породы как единой многокомпонентной многофазной системы, твердый скелет которой моделируется совокупностью частиц с эффективной молярной массой. Модели использованы для изучения закономерностей фазового равновесия воды в мерзлых горных породах. Адекватность моделей проверена сравнением результатов расчета по ним изотерм адсорбции (рис. 6), содержания

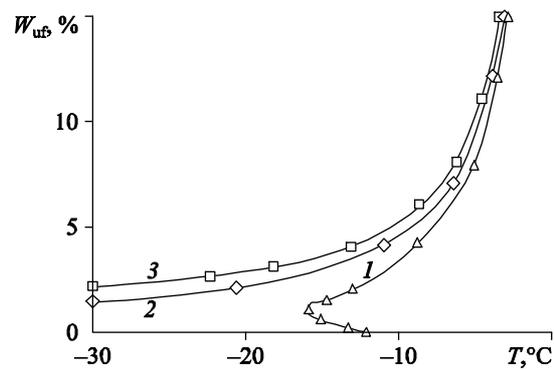


Рис. 7. Содержание незамерзшей воды в двухкомпонентной регулярной модели горной породы. $M_{sc} = 4000$ г/моль.

1—3 — см. рис. 6.

незамерзшей воды с экспериментальными данными и эмпирическими формулами. Исследования показали, что в горных породах при высоких значениях энергии взаимодействия компонентов возникают условия, при которых состояние поровой воды является неустойчивым. Это проявляется в виде ступенчатости температурной зависимости незамерзшей воды (рис. 7).

Программа 3.2.2. Турбулентный и ламинарный теплоперенос в неоднородных средах, в том числе мини- и микроканалах, в нестационарных условиях и условиях термодинамической неравновесности (координатор акад. В. Е. Накоряков)

В Институте теплофизики им. С. С. Куталадзе экспериментально исследованы закономерности вскипания, развития кризисных явлений в стекающих волновых пленках жидкости при различных нестационарных законах тепловыделения. Показано, что при тепловых потоках высокой интенсивности распад стекающей пленки жидкости определяется режимами распространения самоподдерживающихся фронтов вскипания со сложной формой промежуточных пространственных структур, имеющих вид, подобный фрактальным формам (рис. 8). Проведено обобщение опытных данных по характеристикам переходных процессов, параметрам структур при различных степени орошения и тепловой нагрузке (рис. 9). Выявлено, что для неравномерно распределенной по толщине пленке жидкости в динамиче-

ском процессе происходит последовательная смена механизма распада пленочного течения от распространения сухих пятен на первой стадии с переходом к режиму самоподдерживающихся фронтов испарения, характеризующемуся более чем на порядок высокими скоростями перемещения границ (рис. 10). Критические значения амплитуды импульсов при периодическом тепловыделении, соответствующие осушению, определяются динамикой подвижных границ смачивания в процессе вытеснения регулярных струй жидкости с развитым пузырьковым кипением. Полученные результаты важны при определении границ оптимальных и аварийных режимов работы различных типов теплообменников с высокой и нестационарной теплонапряженностью, при разработке технологии создания модифициро-

ванных приповерхностных слоев материалов под воздействием высокоинтенсивных импульсных потоков энергии.

В том же Институте в результате экспериментального и численного исследования обтекания окислителем пористой пластины, через которую подается горючее, создана база данных по тепловому пограничному слою при горении в воздухе водорода, разбавленного азотом (массовая доля водорода в топливной смеси 1—7%), в диапазоне скоростей основного потока 1—5 м/с. Обнаружено слабое влияние сил плавучести в указанном диапазоне скоростей, а также удовлетворительное описание зависимостью $0,47 Re_x^{-0,5}$ теплообмена в реагирующем ламинарном пограничном слое (рис. 11). Осуществлена верификация численной реализации разработанной модели реагирующего пограничного слоя, получено удовлетворительное описание эксперимента. Проведено численное моделирование горения водорода и метана в пограничном слое в широком диапазоне параметров для различных тепловых условий на стенке (по длине постоянна температура стенки или температура подаваемого топлива) и распределениях горючего на стенке (постоянная концентрация или массовый расход топлива). На основании численного моделирования впервые установлено, что предыстория течения в пограничном слое с горением играет существенно меньшую роль по сравнению с нереагирующим случаем (рис. 12).

В том же Институте разработан и реализован в оптико-электронном комплексе метод измерения 3D-геометрии крупногабаритных объектов в процессе промышленного произ-

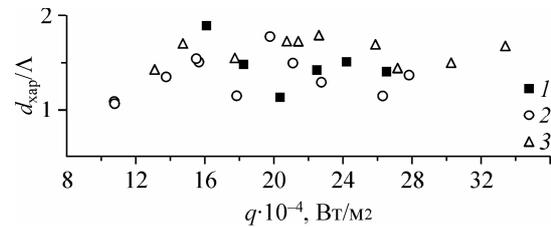


Рис. 8. Характерные поперечные масштабы паровых полостей в переходных режимах распространения фронта осушения при интенсивном вскипании криогенной жидкости.

$Re_{вх} = 60$ (1), 700 (2), 1140 (3).

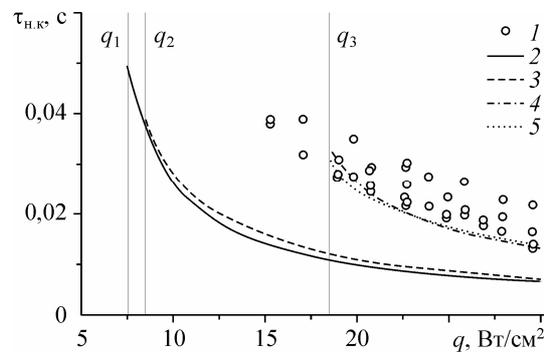


Рис. 9. Сравнение опытных данных по времени ожидания вскипания с расчетной моделью.

$Re = 111$; 1 — эксперимент; 2, 3 — расчет при кондуктивном законе теплообмена в волновой пленке; 4, 5 — с учетом конвективного теплообмена и развития испарения соответственно; 2, 4 — вскипание в остаточном слое; 3, 5 — в гребнях волн; q_1, q_2, q_3 — тепловые потоки, соответствующие подавлению вскипания.

десятков метров, в диапазоне отражательных свойств поверхности более 1 : 10000, отличающийся надежностью и малой стоимостью. Прецизионный контроль 3D геометрии крупногабаритных изделий в процессе производст-

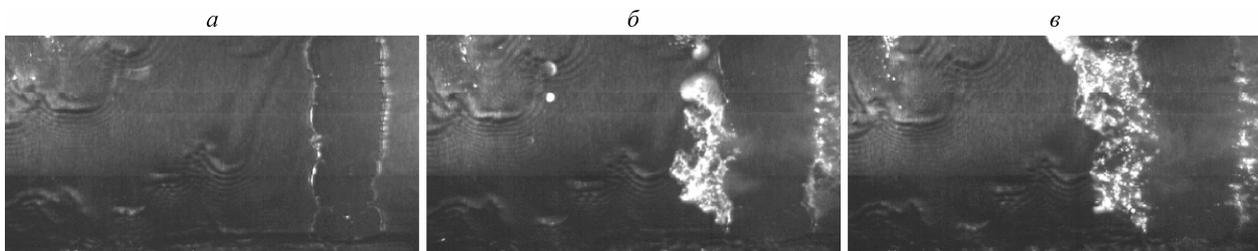


Рис. 10. Смена механизма распада пленочного течения при ступенчатом тепловыделении: режим распространения сухих пятен на первой стадии (а) с переходом к режиму самоподдерживающихся фронтов испарения (б, в) на второй стадии. Жидкий азот.

водства, обеспечивающий проведение бесконтактных измерений с погрешностью менее 0,1% в диапазоне размеров от сантиметров до

ва позволяет существенно повысить КПД высокотехнологических энергетических установок и предотвратить техногенные катастрофы. Раз-

работка может быть успешно использована на

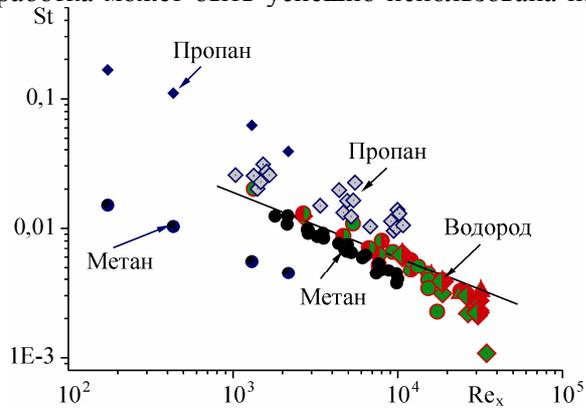


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплообмена от числа Рейнольдса при горении в пограничном слое (данные экспериментов).

предприятиях гидротурбостроения и машино-

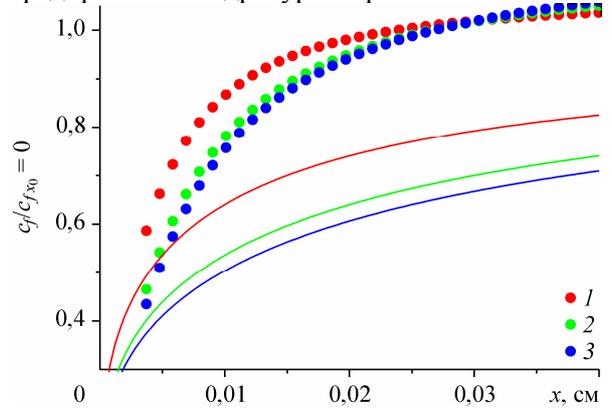


Рис. 12. Отношение коэффициента трения при наличии непроницаемого предвключенного участка к коэффициенту трения без предвключенного участка. Точки — горение, линии — не реагирующее течение. $x_0 = 2$ (1), 4 (2), 5 см (3).
строения, на авиастроительных, судострои-

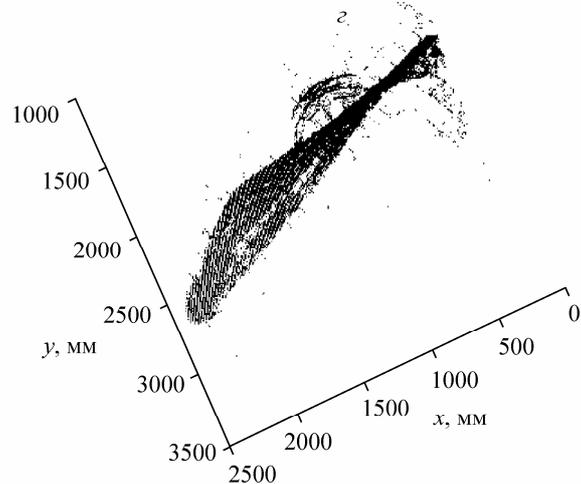
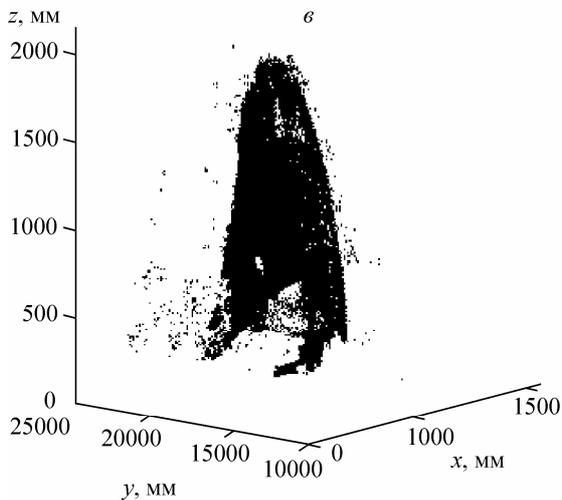
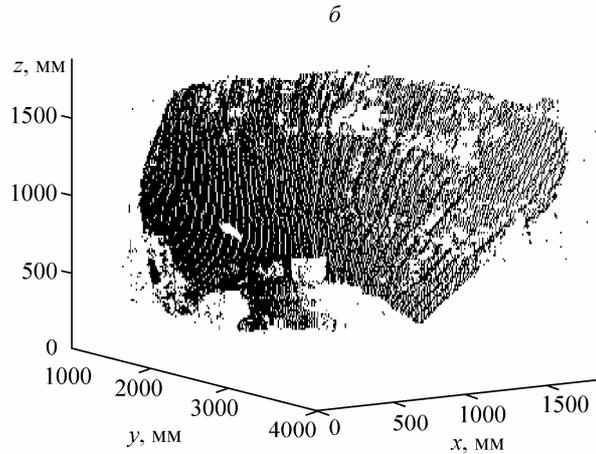
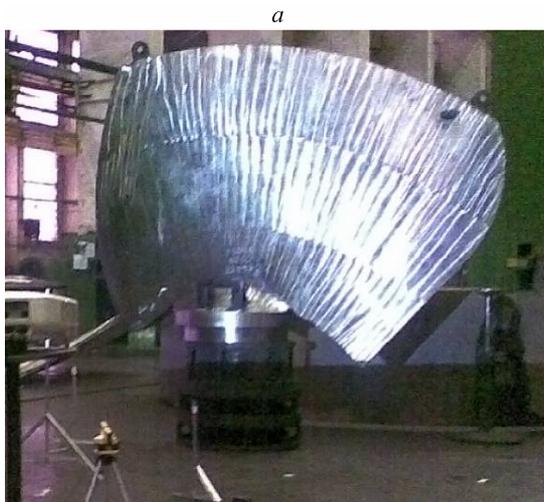


Рис. 13. Лопать гидротурбины размерами 2500 × 2000 × 1000 мм (а) и 3D профиль ее поверхности (б, в, з).

тельных и судоремонтных предприятиях, а также в иных организациях, специализирующихся на работе с крупномасштабными объектами. Проведены промышленные испытания системы на крупнейшем предприятии отечественного гидротурбостроения — филиале ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге, подтвердившие работоспособность предложенного метода и перспективность его дальнейшего развития (рис. 13). Получен патент РФ на изобретение № 2334195.

В том же Институте выполнено экспериментальное исследование структуры течения и теплопереноса импульсного спрея в режиме испарительного охлаждения с регулируемой длительностью импульса. Показано, что процесс охлаждения импульсной струей сопровождается рядом факторов: группировкой различных по диаметру капель по запасенному импульсу, воздействием ударяющихся капель на образовавшуюся пленку и ее испарение, формирование струй и сухих пятен на поверхности теплообменника. Изучено влияние длительности импульсов (1—10 мс) и частоты их повторения (до 50 Гц) на режимы теплопереноса и на возникновение переходных и однофазных течений жидкой пленки. Впервые показано, что при малых временах импульса (1—2 мс)

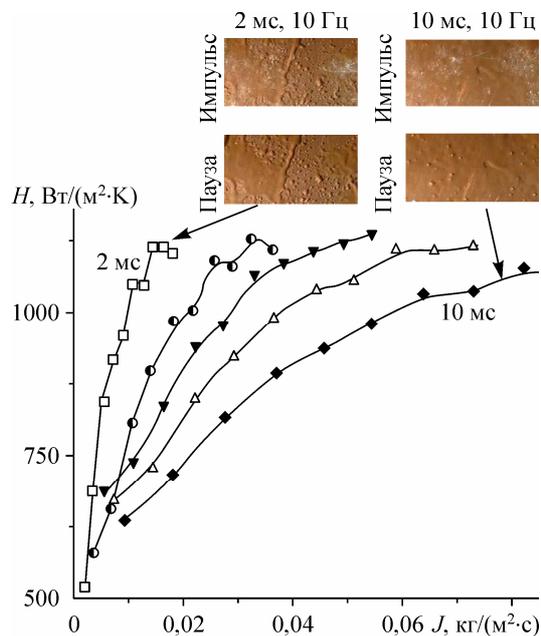


Рис. 14. Зависимость теплового потока от плотности орошающей струи при различной длительности импульсов спрея.

максимум теплообмена достигается при значительно меньшей (в 3—5 раз) массовой скорости жидкой фазы (рис. 14).

Программа 3.2.3. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик (координатор докт. физ.-мат. наук А. М. Оришич)

В Институте теоретической и прикладной механики при газолазерной резке листовых металлов обнаружено, что ультразвуковые колебания разрушают пленку расплава и повышают качество лазерной резки.

В том же Институте при исследовании процессов в жидкой ванне при лазерной сварке в ультразвуковом поле выявлено влияние ультразвука на повышение пластических свойств соединений. В результате воздействия ультразвука предел текучести, временное сопротивление разрушению практически не изменились, но пластичность возросла более, чем на 20 %. Показано, что высокочастотными колебаниями можно эффективно воздействовать на размер и динамику колебаний пузырьков в жидкой ванне, вызывая их ускоренное всплывание (рафинирование расплава) либо схлопы-

вание, что может способствовать уменьшению пористости, увеличению скорости зарождения кристаллов и повышению дисперсности металла шва (рис. 15).

В том же Институте установлено, что введение специально подготовленных наноразмерных порошков тугоплавких соединений в количестве менее 0,05 мас.% при лазерной сварке деталей из титановых сплавов позволяет существенно повысить прочность сварного соединения при одновременном увеличении пластичности металла в сварном шве.

На основе комплексных исследований плазменно-дуговых процессов получены новые данные по эрозии электродов плазмотронов для широкого спектра материалов (бронза, латунь, дисперсионно упрочненная медь, сплавы меди и серебра) в окислительной, восстанови-

тельной и нейтральной газовых средах. Разработаны серии технологических плавильных плазмотронов с цилиндрическим внутренним электродом, работающих как с выносной дугой, так и в струйном режиме с ресурсом работы более 1000 ч в среде воздуха. Технологический плазмотрон мощностью до 1 МВт при токе дуги до 3000 А, работающий на гелии с ресурсом верхнего цилиндрического электрода не менее 150 ч (рис. 16, *а*), предназначен для промышленной рафинировочной плавки титана и внедрен на предприятии ВСМПО «Ависма», г. Верхняя Салда, Россия. Разработанная

промышленная серия плазмотронов в диапазоне мощностей 150—1000 кВт, с рабочим током дуги до 1000 А и ресурсом верхнего цилиндрического электрода не менее 1000 ч (см. рис. 16), в настоящее время используется в технологиях переработки отходов, содержащих металлы и пластик, при извлечении платины из блоков катализаторов очистки автомобильных газов; а также в переработке асбесто-содержащих, бытовых и медицинских отходов в Южной Корее, городах Инчхон, Кьёренг, Йосу, Тэджон.

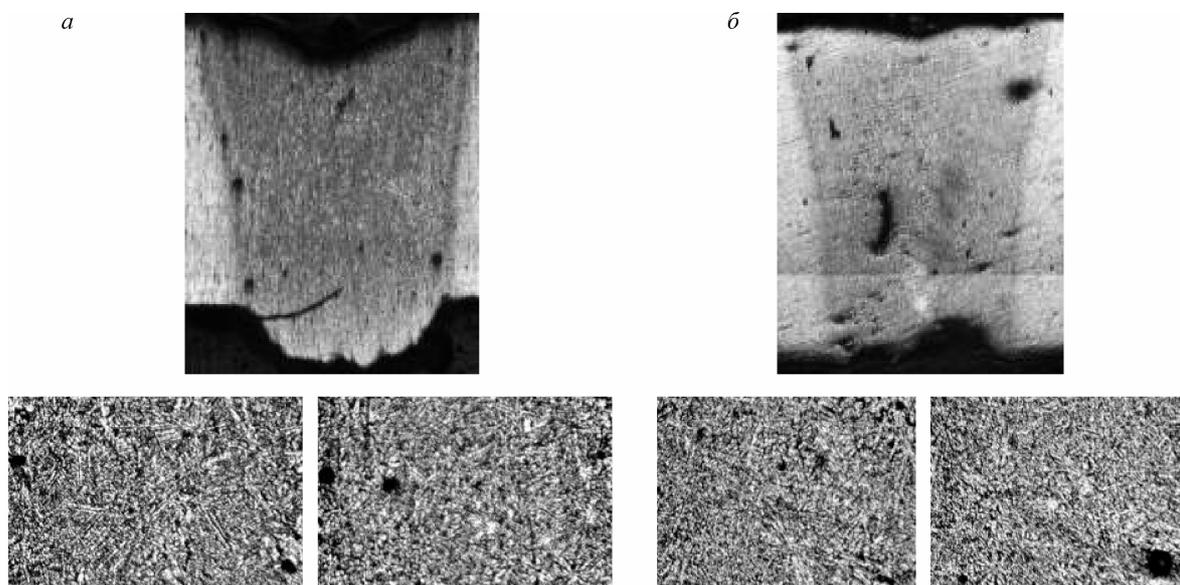


Рис. 15. Микроструктура сварного шва в алюминиевом сплаве 01420, подвергнутом ультразвуковой обработке (*а*), пористость составила 1,41, и без применения обработки (*б*), пористость — 2,41, при этом ультразвуковая обработка снизила и размер самих пор.

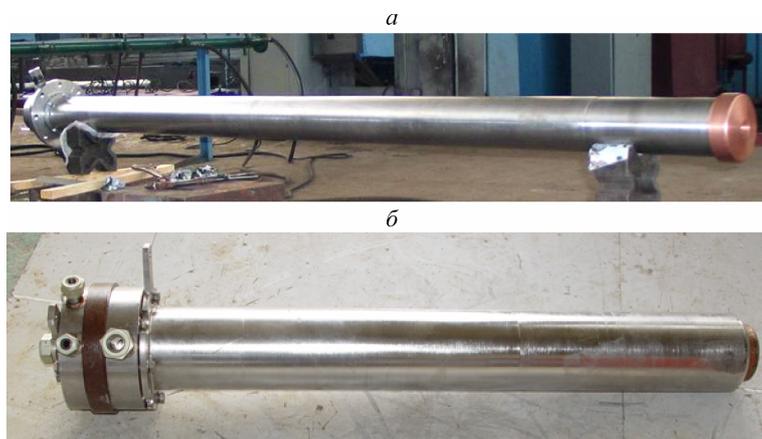


Рис. 16. Плазмотроны для промышленной плавки титана, мощность до 1 МВт, диаметр 230 мм, длина 2,2 м (*а*) и из серии плавильных мощностью от 150 до 1000 кВт для ряда промышленных технологий, плазмообразующий газ — воздух, ресурс работы электродов не менее 1000 часов, диаметр 160—220 мм, длина 0,7—1,5 м (*б*).