

## 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

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе разработан неразрушающий экспресс-метод исследования миграции влаги с применением гамма-излучения. Создан экспериментальный стенд для исследования процессов тепло- и массопереноса в пористых материалах. Локальная влажность материала определялась по ослаблению пучка гамма-излучения. Источником излучения являлся изотоп цезия-137 с энергией гамма-квантов 662 кэВ и диаметром пучка 4 мм.

Выполнен цикл экспериментальных исследований процессов влагопереноса в пористых материалах при различных тепловлажностных граничных условиях. В результате были получены данные по динамике изменения влажности в пористых материалах при различных режимах увлажнения. На основании полученной экспериментальной картины эволюции профилей влажности в автоматических координатах определена зависимость коэффициентов диффузии влаги в материалах от его влажности (рис. 5). Показано, что в режиме сорбционного увлажнения при малых влажностях коэффициент диффузии влаги имеет низкие значения и возрастает с ростом влажности материала, а в режиме капиллярной пропитки наблюдается резкий рост коэффициента диффузии влаги при увеличении влажности материала.

Разработанный гамма-метод позволяет определять коэффициент массопереноса для пористых материалов с высокой точностью без их разрушения. Полученные экспериментальные данные использованы для построения и верификации нестационарной модели расчета совместного тепло- и массопереноса в пористых материалах.

В том же Институте разработан новый метод для исследования фазовых равновесий жидкость—пар в широких интервалах параметров состояния, включая околокритическую область.

Метод основан на измерении коэффициента ослабления узкого пучка гамма-излучения в двухфазном образце и последующем расчете из полученных данных плотности равновесных жидкости и пара. Создан экспериментальный стенд (гамма-плотномер), реализующий разработанную методику и обладающий высокими метрологическими характеристиками. Основным достоинством нового метода является то, что он позволяет исследовать локальные термические характеристики образца. Это особенно важно при исследовании критических явлений, когда, вследствие аномально высокой сжимаемости вещества, проявляется так называемый гидростатический эффект, затрудняющий или даже делающий невозможным применение традиционных методик исследования термических свойств и фазовых равновесий.

С использованием гамма-метода получены новые надежные экспериментальные данные по форме линии равновесия жидкость—пар в координатах температура—плотность ряда фторорганических соединений (рис. 6), перспективных для использования в новых экологически чистых и энергосберегающих техно-

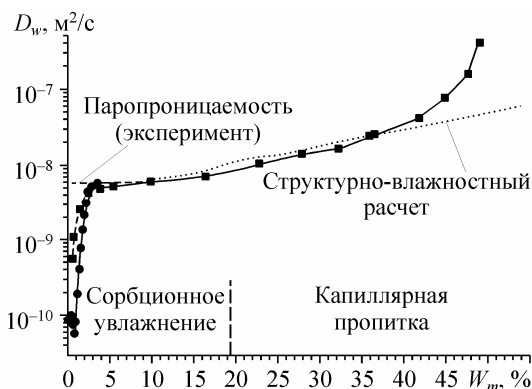
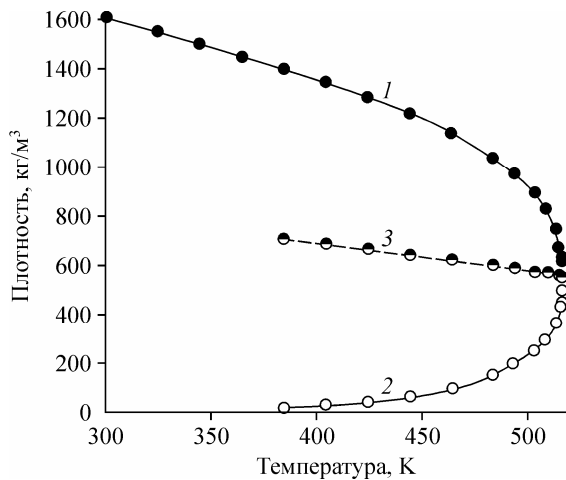


Рис. 5. Эффективный коэффициент диффузии влаги газобетона при различных режимах увлажнения.



**Рис. 6.** Ортобарические плотности перфторбензола вдоль кривой равновесия жидкость—пар. 1, 2 — экспериментальные данные для жидкой и паровой фаз соответственно; 3 — средняя плотность.

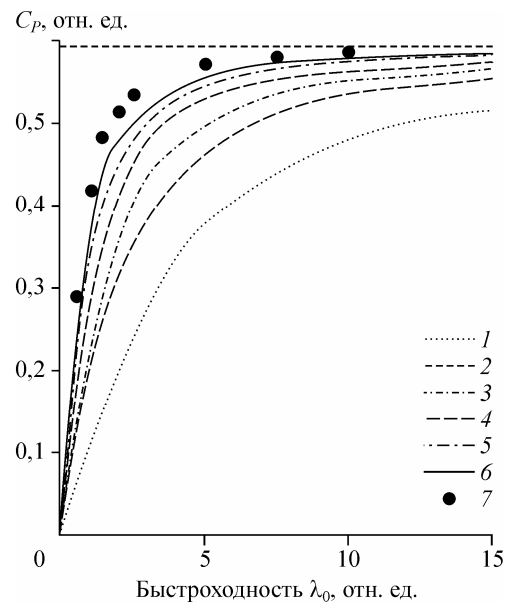
логиях (гексафторбензол, пентафторбензол, фторзамещенные фреоны R227ea и R236ea).

Данные получены в широком интервале параметров состояния, включая критическую область. С высокой точностью определены координаты критических точек и критические индексы кривых сосуществования жидкость—пар исследованных веществ.

В том же Институте совместно с Датским техническим университетом проведено теоретическое исследование по оценке максимума кинетической энергии ветра, которая может быть утилизирована ветряком. Решение получено на основе дальнейшего развития классической теории идеального винта с конечным числом лопастей с помощью построения эффективного алгоритма для вычисления функции Гольдштейна, определяющей распределение циркуляции вдоль лопасти оптимального винта. Найденный коэффициент использования ветра впервые не противоречит абсолют-

### Программа 3.2.2. Турбулентный и ламинарный теплоперенос в неоднородных средах, в том числе мини- и микроканалах, в нестационарных условиях и условиях термодинамической неравновесности

В Институте теплофизики им. С. С. Кутеладзе экспериментально исследованы процессы растворения и образования гидрата фреона-12 и углекислого газа за ударной волной умеренной амплитуды в воде с пузырьками газа. Показано, что эти процессы обусловлены дроблением газовых пузырьков, приводящим к



**Рис. 7.** Максимальные значения коэффициента использования энергии ветра как функция быстроходности в зависимости от количества лопастей идеального ветряка, N: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 5 (4), 10 (5), 20 (6). 7 — оценка Г. Глауерта.  $\lambda_0$  — отношение линейной скорости концов лопастей к скорости ветра.

ному значению (59 %) предела Ланчестера—Беца—Жуковского, а при увеличении числа лопаток в колесе турбины растет и приближается к оценке Г. Глауерта (рис. 7), сделанной для колес с бесконечным числом лопаток, но с учетом закрутки потока в следе.

Вопрос о максимуме кинетической энергии ветра, утилизируемой ветряком, имеет принципиальное значение для развития ветровой энергетики. Но помимо большого практического значения работа представляет интерес как несомненный успех в развитии теоретической аэромеханики роторных лопастных машин.

резкому увеличению площади межфазной поверхности и уменьшению размера газовых включений. Установлено, что характерное время полной гидратизации газа за ударной волной на несколько порядков меньше, чем при использовании других методов гидратообразования, и составляет несколько миллисекунд.

Исследованы механизмы гидратообразования за фронтом волны. Показано, что гидратообразование происходит вследствие сорбционного роста гидратной пленки на поверхности газового пузырька, который определяется кинетическими параметрами (величиной переохлаждения и давлением в среде) и характеризуется очень высокой скоростью. Выполнен теоретический анализ процесса гидратообразования за ударной волной со ступенчатым профилем и получено соответствие с экспериментальными данными (рис. 8). Показано, что увеличение статического давления в среде для одинаковых относительных амплитуд волн приводит к увеличению скоростей гидратообразования и растворения газа в жидкости. Показано, что для углекислого газа скорости растворения и гидратообразования за фронтом ударной волны близки по величине и разделить эти процессы в эксперименте не удается.

Экспериментально исследованы процессы растворения и гидратообразования углекислого газа за ударной волной умеренной амплитуды в воде с пузырьками из смеси азота и углекислого газа. Показано, что увеличение статического давления в газожидкостной среде приводит к увеличению влияния нереагирующего газа азота на процессы растворения и гидратообразования.

Представленные результаты важны для создания газогидратных технологий транспортировки и хранения природного газа и утилизации вредных для экологии Земли газов.

В том же Институте исследованы механизмы влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на теплоперенос при абсорбции пара растворами солей. С этой целью проведены эксперименты по абсорбции водяного пара первоначально неподвижным слоем водного раствора бромистого лития с добавками в качестве ПАВ *n*-октанола с концентрацией 25—400 ppm (как меньшей, так и большей предела растворимости). С помощью тепловизионной техники обнаружены температурные неоднородности перемещающейся в процессе абсорбции межфазной поверхности. Кино- и фотосъемкой зафиксировано возникновение конвекции в приповерхностном слое. Сравнение измеренных профилей температуры с теоретическими и экспериментальными данными без ПАВ показало, что наличие в растворе ПАВ приводит к увеличению температуры на всех уровнях слоя и к снижению концентрации воды вблизи поверхности слоя (рис. 9). При этом

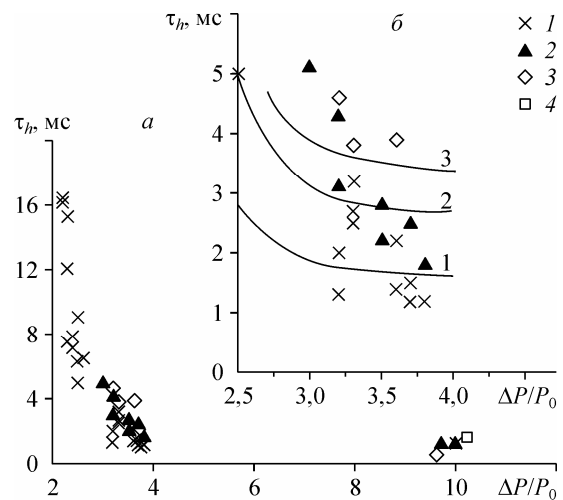


Рис. 8. Зависимость времени гидратизации газа (фреона-12) за ударной волной ступенчатого профиля от ее амплитуды.

*a* — экспериментальные данные; *б* — сравнение экспериментальных данных (символы) с расчетом (линии), *T*, °C: 1 (1), 4,9 (2), 6,0 (3), 9,1 (4).

происходит существенное изменение профиля концентрации воды с увеличением ее среднего значения по толщине слоя, а также с увеличением массы абсорбируемого вещества. Конвективное перемешивание в приповерхностном слое при концентрациях ПАВ, больших предела растворимости (100—400 ppm), объясняется наличием островков нерастворенного ПАВ, зафиксированных фото- и киносъемкой и имеющих существенно меньшее поверхностное натяжение, чем окружающий их раствор.

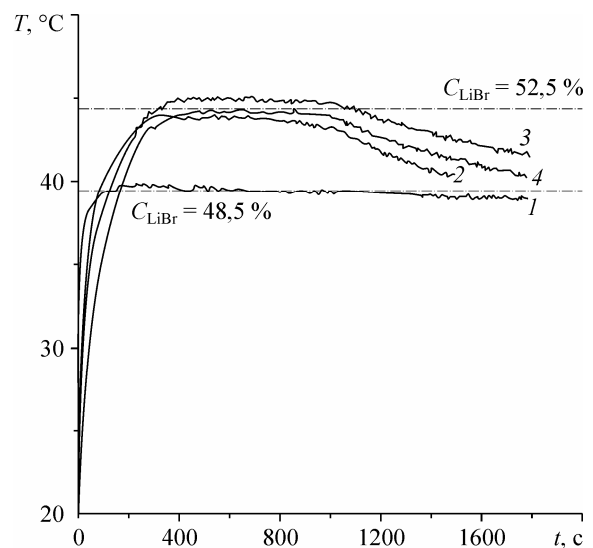


Рис. 9. Средняя температура межфазной поверхности при разных концентрациях ПАВ.

1 — без ПАВ; 2 — 25 ppm; 3 — 50 ppm; 4 — 75 ppm.

Возникающие при этом градиенты поверхностного натяжения являются причиной конвекции. Впервые получено экспериментальное подтверждение гипотезы «salting out», следствием

которого является возникновение приповерхностной конвекции при введении в раствор добавок ПАВ, меньших предела растворимости.

### Программа 3.2.3. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик

В Институте теоретической и прикладной механики установлено, что при условии качественного реза в диапазоне толщин 5—25 мм ширина реза  $S$  должна возрастать с увеличением толщины:  $S = b + at$  (рис. 10).

Удельный объемный энерговклад  $\varepsilon = W/(vStE_m)$ , здесь  $v$  — скорость резки;  $t$  — толщина листа;  $S$  — ширина реза;  $E_m$  — энергия, необходимая для плавления и нагрева до температуры плавления единицы объема удаляемого металла. Из условий  $\varepsilon = \text{const}$  и  $S = b + at$  вытекает важное следствие: энергия  $W/v$ , приходящаяся на единицу длины реза, растет с толщиной квадратично при условии качественного реза:  $W/v = At + Bt^2$ , где  $A, B$  — эмпирические коэффициенты, которые могут зависеть от характеристик лазера и ряда технических факторов, в частности, чистоты кислорода. Полученные результаты позволяют оценить предельные возможности лазерной резки и могут существенно повлиять на перспективность применения лазеров для качественной резки толстых, более 25 мм, листов низкоуглеродистой стали.

В том же Институте проведено экспериментальное исследование процесса сварки разнородных материалов (алюминий—титан, титан—сталь) с помощью непрерывного  $\text{CO}_2$ -

лазерного излучения с применением наноразмерных модифицирующих инокуляторов. В качестве инокулирующих порошковых материалов использовались тугоплавкие соединения  $\text{TiN}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , плакированные хромом. Концентрация модифицирующей композиции, вводимой в сварочную ванну, составляла не более 0,05 мас.%. Подготовленная композиция наносилась в виде суспензии на поверхность свариваемых пластин. Для оценки необходимого количества модификатора при подготовке суспензии рассчитывалась масса проплавленного металла при заданных значениях мощности и скорости сварки. Толщина свариваемых пластин составляла 1,5—2,0 мм, мощность лазерного луча — 2,3 кВт, а скорость сварки менялась в пределах от 1,5 до 5,0 м/мин. Показано, что применение наномодификаторов позволяет повысить скорость сварки при той же мощности луча за счет увеличения коэффициента поглощения интенсивности лазерного луча. При этом улучшается качество соединения. Измельчаются в 2—4 раза структурные составляющие шва. Меняется морфология кристаллического зерна: вместо игольчато-дендритной формируется дисперсная равноосная структура, выравниваются механические характеристики, сокращаются размер шва и зона термического влияния, соответственно улучшаются прочностные и пластические свойства шва: относительное удлинение повысилось в 2,0—4,9 раза, предел прочности — в 1,23—1,35, а предел текучести в 1,8—2,0 раза. Иллюстрация улучшения морфологии и структуры соединения приведена на фотографиях (рис. 11), полученных методом сканирующей электронной микроскопии шлифов. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию режима сварки, состава и концентрации наномодифицирующей присадки.

Разработаны гибридные лазерно-плазменные системы, расширяющие технологические возможности лазеров. Анализ показал, что возможны несколько вариантов лазерно-плазмен-

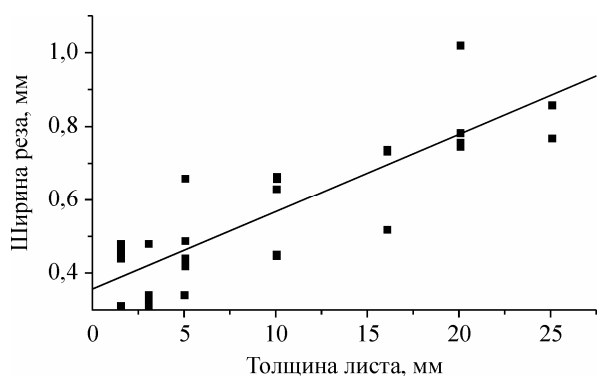
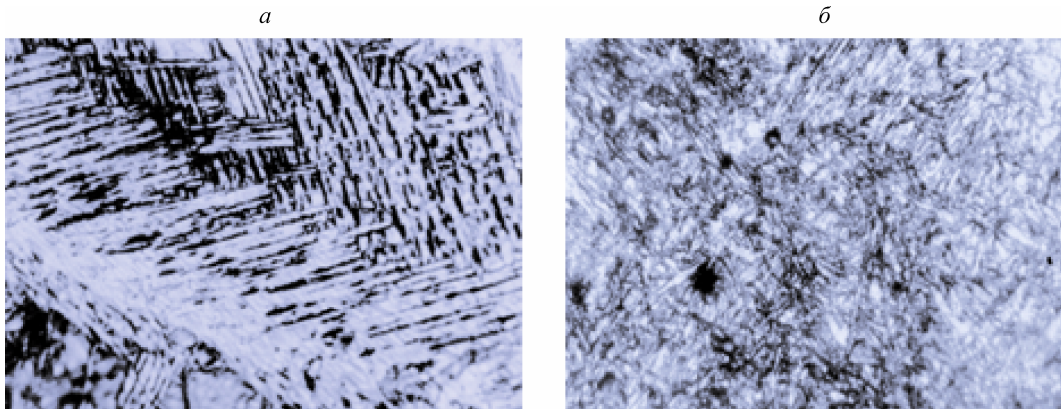


Рис. 10. Зависимость ширины реза от толщины листа.

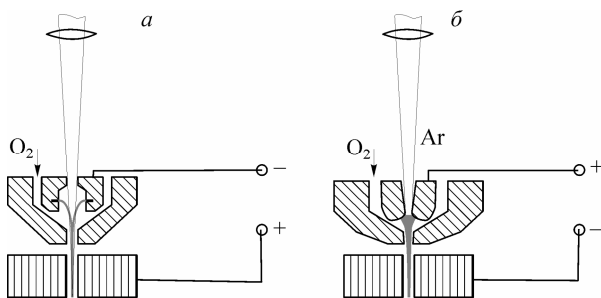
Сталь в кислороде.



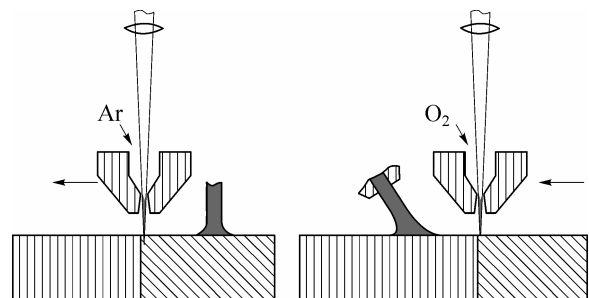
**Рис. 11.** Применение нанопорошковых модификаторов при лазерной сварке.  
*a* — без модифицирующего порошка; *б* — с 20-микронным порошком TiN + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

ной технологии, которые можно поделить на две группы: совмещенная схема, где пространственно объединяются лазерный и плазменный источники тепла, и комбинированная схема, где плазменный источник тепла пространственно отделен от лазерного и выполняет вспомогательные функции подогрева поверхности обрабатываемого материала перед воздействием лазерного луча или после его воздействия. Схемы процессов приведены на рис. 12 и 13. Обе схемы могут применяться в процессах резки и сварки металлов. В совмещенной схеме возможны два варианта подключения плазмотрона: на прямой (см. рис. 12, *a*) и на обратной (см. рис. 12, *б*) полярности. На прямой полярности возможен плазменный подогрев преимущественно приповерхностной части реза или сварного шва. При обратной полярности возможно осуществление плазменного подогрева по всей глубине разрезаемой детали, что обусловлено высокой подвижностью катодных

пятен. Плазмотрон на прямой полярности может быть создан на базе уже разработанных термохимических катодов с расщеплением прикатодного участка дуги. Для обратной полярности включения плазмотрона разработан электрод с отдельной подачей инертного и молекулярного газов и с относительной долей расхода инертного газа 5—100 %. На этом электроде получена диффузная анодная привязка до токов 400 А при относительной доле расхода инертного газа 5—10 %. При повышении доли аргона ток может быть увеличен до 1000 А и более при сохранении диффузного характера анодной привязки. Диапазон токов достаточен для технологических процессов, связанных как с резкой металла, так и с его сваркой. Для комбинированной схемы процесса разработаны специализированные плазмотроны с турбулентной и ламинарной плазменными струями.



**Рис. 12.** Совмещенные схемы лазерно-плазменной обработки.  
*a* — на прямой, *б* — на обратной полярности.



**Рис. 13.** Комбинированные схемы лазерно-плазменной обработки.