

**ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.16.
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ;
ТЕПЛОМАССОБМЕН, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
И ТЕХНОЛОГИИ НА ЕЕ ОСНОВЕ**

Программа Ш.16.1. Теплофизические основы энергоэффективных технологий (координаторы член-корр. РАН С. В. Алексеев, докт. техн. наук А. П. Бурдуков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе совместно с учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера методами лазерной вспышки, дилатометра, сканирующего дифференциального и C, λ -калориметров исследованы температуропроводность, тепловое расширение и теплоемкость искусственных графитов МПГ-6, CGD, РОСО, а также впервые синтезированного графитового композита на основе изотопа углерода ^{13}C , который предполагается для использования в конверторе нейтронной мишени, в интервале температур 20—1400 °С. Экспериментальные результаты для композита ^{13}C получены впервые и в настоящее время остаются единственными. Проведены обобщение и анализ экспериментальных и литературных результатов по свойствам исследованных материалов, на основании чего сформированы таблицы справочных данных и оценены их погрешности. На рис. 7 приведена обобщающая зависимость, которая позволяет оценивать теплопроводность графита различной пористости в широком интервале температур с привлечением только данных по макроскопической плотности образцов. Полученные результаты важны для оптимизации технологии получения материалов и атомной энергетики.

В том же Институте разработано горелочное устройство для использования в технологии безмазутного розжига котла на основе механоактивированного угля микропомола. Используется система, подобная реализуемой в плазменных технологиях розжига пылеугольных котлов.

Устойчивый режим горения обеспечивается в широком диапазоне расхода угля микропомола и коэффициента избытка воздуха. Представленное решение (рис. 8) позволяет проектировать конструкции растопочных горелок с использованием механоактивированного угля для топочных камер энергетических

котлов. Замещение используемого при розжиге мазута эквивалентным по теплу количеством механоактивированного угля микропомола поможет отказаться от использования мазута на пылеугольных блоках, что даст значительный экономический эффект.

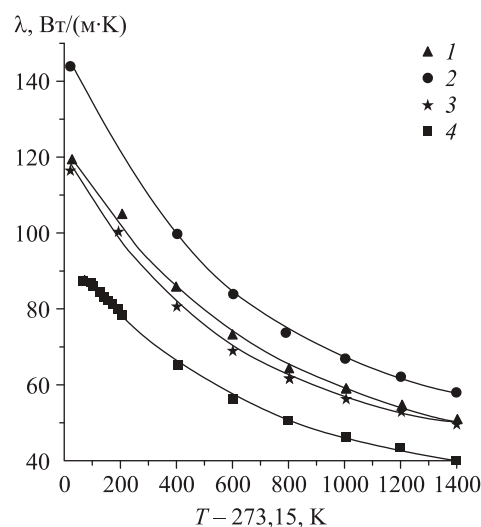


Рис. 7. Теплопроводность образцов МПГ-6 различной плотности, кг/м³.

1 — 1783; 2 — 1825; 3 — 1776; 4 — 1664.

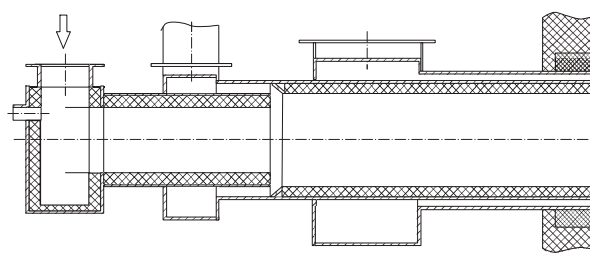


Рис. 8. Схема горелочного устройства.

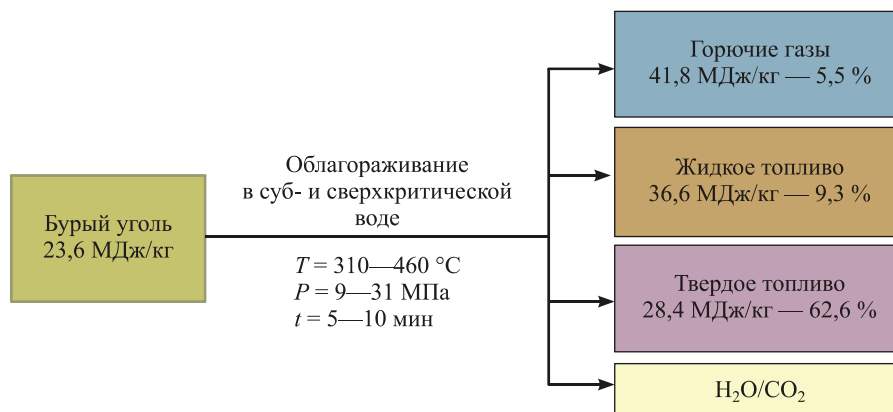


Рис. 9. Схема конверсии бурого угля.

В том же Институте впервые экспериментально получены данные о механизмах и кинетике конверсии органической массы бурых углей в сверхкритической воде (СКВ). Предложены два оригинальных способа конверсии углей: первый заключается в непрерывной подаче частиц угля в составе водоугольной смеси в трубчатый реактор с заданным распределением температуры (300—750 °C) при давлении

30 МПа и сепарировании реактантов на выходе из реактора, а второй способ — в ступенчатом повышении температуры (300—460 °C) реактора, заполненного углем, периодическом напуске СКВ до заданного давления (10—30 МПа) и сбросе реактантов из реактора. Оба способа обеспечили высокий выход жидких продуктов, получение энергоемкого твердого топлива в виде пористых частиц угля и горючих газов и получение топлива, свободного от значительной доли гетероатомов O, S и N. Скорости горения растворенных в СКВ углеводородов соответствуют скоростям газозаменных реакций, и тепло выделяется непосредственно в теплоноситель. Это исключает проблемы кризиса кипения, возникающие при подводе тепла через стенки. Низкие температуры сжигания топлив в СКВ исключают образование вредных оксидов NO_x, SO₂, а предложенные замкнутые схемы конверсии предотвращают выброс аэрозолей в окружающую среду

Результаты данной работы являются базовыми для создания промышленных технологий конверсии бурых углей в СКВ непосредственно в местах добычи. Тот факт, что уже при низкой температуре в СКВ/O₂-флюиде обеспечивается полное сжигание твердого остатка конверсии, может стать основой создания нового типа котлов-реакторов для получения тепловой и электрической энергии (рис. 9).

В том же Институте разработана мобильная установка для проверки поточных вискозиметров в условиях эксплуатации (рис. 10). Установка предназначена для калибровки (поверки) на месте эксплуатации средств измерений динамической вязкости нефти (вибрационных вискозиметров), работающих в составе блоков измерений качества нефти на магистральных



Рис. 10. Внешний вид установки для проверки поточных вискозиметров.

нефтепроводах. Блочная структура установки позволяет оперативно в полевых условиях создавать поверочный комплекс сравнения поверочного прибора с эталонным. В качестве эталонных средств измерения используются преобразователь плотности и вязкости жидкости измерительный Solartron7829 и преобразователь вязкости жидкости измерительный Covimat 105 (205). В качестве поверочных жидкостей используются смесь воды и глицерина, ин-

дустриальное и трансформаторное масла при температуре 20—50 °С, погрешность $dT < 0,10$ °С. Установка выполнена в модульном исполнении, позволяющем транспортировать ее автомобильным или авиационным транспортом, и состоит из четырех блоков, которые в рабочем состоянии соединены в единую измерительную систему с помощью рукавов высокого давления и кабельных соединений.

Программа Ш.16.2. Турбулентный и ламинарный теплообмен в многофазных средах при наличии фазовых переходов и химических реакций, в том числе в мини- и микроканалах (координатор акад. В. Е. Накоряков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе выполнено комплексное экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в модели-имитаторе тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторной установки. В качестве объекта исследования была взята 37-стержневая сборка стержней гексагональной геометрии, по своим геометрическим параметрам соответствующая тепловыделяющей сборке водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Были проведены прецизионные измерения распределения давления, коэффициентов гидравлического сопротивления, скорости течения жидкости, локального трения на стенке имитаторов ТВЭЛов и локального теплообмена на центральном стержне сборки (рис. 11). Выполнены измерения распределения газосодержания в межствельных ячейках, межъячеистого перехода газовой фазы, размеров и скорости

пузырьков. Исследовано влияние двухфазного течения на теплообмен между имитатором ТВЭЛ и жидкостью. На основе измерений предложена карта режимов двухфазного течения в сборке-имитаторе ТВС, построены гистограммы распределения газовых пузырьков по размерам. Изучено влияние различных типов дистанционирующих и перемешивающих решеток на характеристики потока при одно- и двухфазном течении жидкости через имитатор ТВС. Впервые для такого случая получены результаты по трехмерной структуре течения, изучено влияние различных конструктивных элементов на его характеристики.

Полученные результаты переданы организациям, разрабатывающим конструкции элементов реакторов типа ВВЭР, и используются при теплогидравлическом обосновании новых конструкций ТВС для ВВЭР.

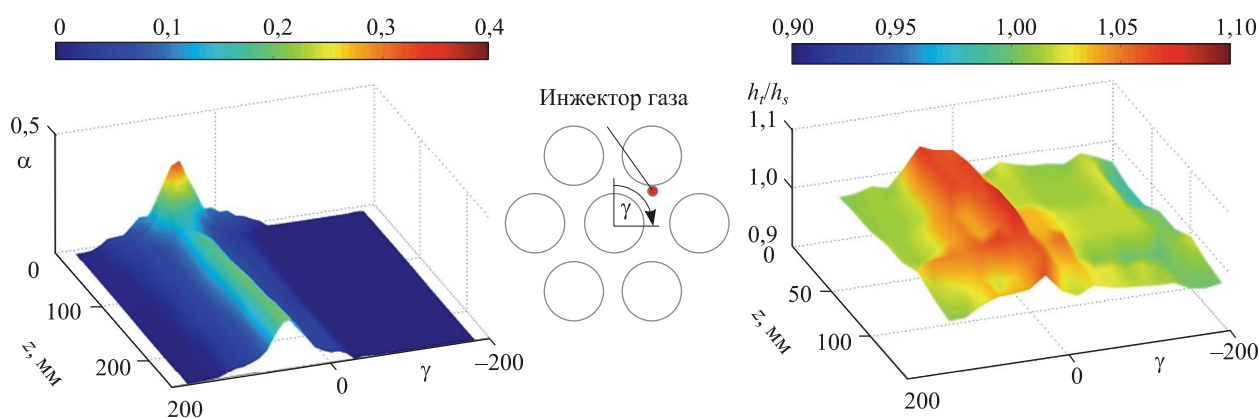


Рис. 11. Распределение локального газосодержания (слева) и относительного коэффициента теплообмена (справа) за дистанционирующей решеткой вокруг центрального стержня сборки при двухфазном течении h_s , отнесенного к однофазному h_s .

В том же Институте экспериментально выявлены механизмы фазовых превращений в микроканалах и разработан новый метод расчета теплоотдачи при кипении движущейся жидкости. Рассмотрены механизмы кипения движущейся жидкости в каналах с размером существенно меньше капиллярной постоянной. Установлено, что в стесненных условиях наблюдается значительная интенсификация пузырькового кипения и вынужденной конвекции и предложено уравнение для расчета интенсификации теплоотдачи при малых числах Вебера. Для кольцевого и псевдокольцевого режима течения толщина пленки жидкости в микроканальном теплообменнике может быть сравнима по величине с диаметром критического зародыша, что вызывает подавление пузырькового кипения и развитие кризисных явлений. Предложен новый метод расчета теплоотдачи при кипении движущейся жидкости, основанный на использовании факторов интенсификации теплоотдачи в стесненных условиях и подавления кипения в сверхтонких пленках жидкости. На рис. 12 показано влияние паросодержания на коэффициент теплоотдачи при кипении хладона R-21 в медном микроканальном теплообменнике с поперечным сечением каналов 335×930 мкм. В широком диапазоне тепловых потоков и массовых расходов предложенная модель хорошо соответствует экспериментальным данным, исключая паросодержания больше 0,5. В этой области необходим учет подавления двухфазной вынужденной конвекции в условиях образования сухих пятен на стенках канала.

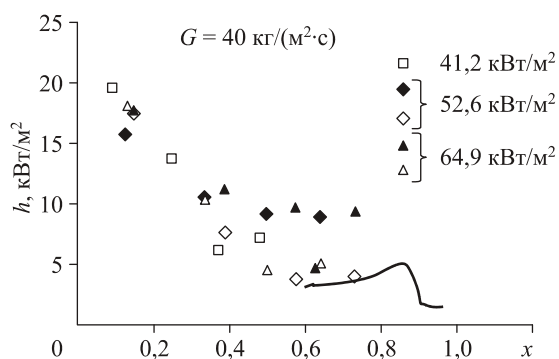


Рис. 12. Влияние паросодержания на коэффициент теплоотдачи при кипении R-21 в микроканальном теплообменнике. Светлые символы — экспериментальные данные, темные символы — расчет с учетом пузырькового кипения, линия — расчет по модели испарения пленки жидкости.

Сотрудниками того же Института экспериментально исследованы закономерности теплообмена, развития кризисных явлений при испарении и кипении в условиях пленочных течений фреонов и их смесей на поверхностях с различной структурой. Были исследованы гладкие поверхности, трубы с глубоким оребрением, винтовой накаткой, трехмерной текстурой, с пескоструйной шероховатостью. Показано, что на структурированных поверхностях с глубоким оребрением в режиме испарения интенсификация теплообмена (рис. 13) достигается за счет изменения структуры волновой поверхности пленки жидкости. Наличие спутного потока пара также приводит к интенсификации теплообмена. Результаты экспериментов показали, что при малой степени орошения ($Re < 50$) в режиме испарения коэффициент теплоотдачи на вертикальной структурированной трубе с горизонтальным оребрением синусоидальной формы ниже, чем на гладкой.

В режиме перехода к пузырьковому кипению значительная интенсификация теплообмена достигается за счет уменьшения температурных напоров, необходимых для активации центров парообразования. Выявлено, что интенсивность теплообмена в режиме пузырькового кипения зависит как от геометрии структурированных поверхностей, так и от плотности орошения и теплового потока. Течение пленки на поверхности с трехмерной структурой становится более устойчивым при малых числах Рейнольдса пленки, что приводит к повышению критического теплового потока, соответствующего образованию сухих пятен.

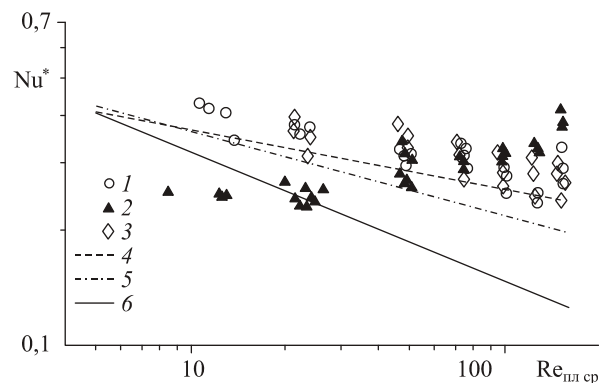


Рис. 13. Теплообмен при испарении бинарной смеси фреонов на структурированных поверхностях.

1 — гладкая поверхность; 2 — горизонтальное оребрение; 3 — трехмерная текстура; 4 — Alhuseini et al., 1998; 5 — Chun, Seban, 1971; 6 — Nusselt.

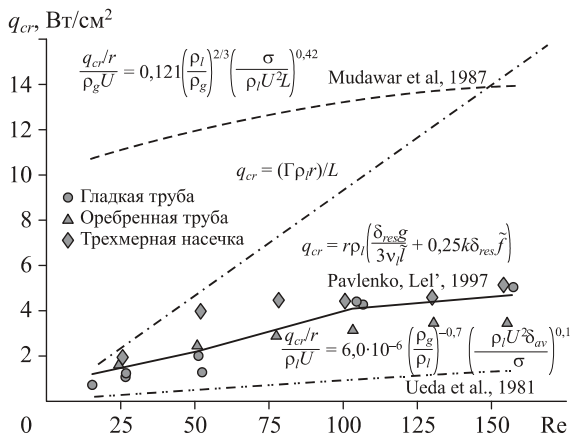


Рис. 14. Критический тепловой поток на структурированных поверхностях.

Важнейшим выводом данной работы является то, что развитие кризисных явлений в режимах неразвитого пузырькового кипения в стекающих пленках определяется закономерностями возникновения сухих пятен, характерными для режимов распада остаточного слоя интенсивно испаряющейся волновой пленки жидкости (рис. 14, 15).

Практическое значение представленных результатов связано с разработкой способов интенсификации теплообмена при кипении и испарении и расширением границ оптимальных и безопасных режимов работы различных типов пленочных теплообменных аппаратов.

В том же Институте экспериментально исследованы условия срыва пламени в пограничном слое со вдувом водорода. Важным отличием горения газообразного топлива от горения жидких топлив при их испарении является то, что изменяя скорость вдува или разбавляя топливо инертным реагентом, можно управлять как положением фронта пламени, так и уровнем температур в пограничном слое.



Рис. 15. Развитие кризиса на гладкой (а) и структурированных (б, в) поверхностях.

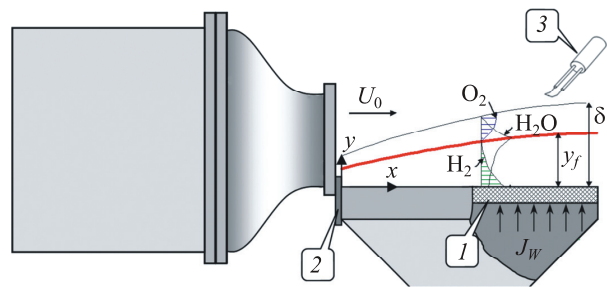


Рис. 16. Схема течения.

1 — пористая пластинка, 2 — стабилизатор пламени, 3 — датчик анемометра.

Экспериментальное исследование проводилось в дозвуковой аэродинамической трубе (рис. 16) с сечением канала на входе в рабочую часть 105×105 мм при скорости воздушного потока 1—10 м/с. Топливо (H_2/N_2) подавалось равномерно в пограничный слой через нижнюю горизонтальную пористую пластину. Математическая модель основана на полных нестационарных уравнениях Навье—Стокса, переноса энергии, компонент газовой смеси и химической кинетики в двумерной плоской постановке.

Данные, характеризующие границу параметров, при которых происходит устойчивое воспламенение и погасание водород-азотной смеси в пограничном слое, представлены на рис. 17 в виде зависимости относительного вдува от массовой концентрации водорода в топливной смеси.

С уменьшением содержания водорода в смеси требуемая для устойчивого горения интенсивность вдува увеличивается и при концентрации водорода менее 0,5 % течение в пограничном слое не воспламеняется практически при любых расходах топлива. Эта величина концентрации водорода оказывается близкой к значению нижнего предела воспламенения заранее перемешанной смеси.

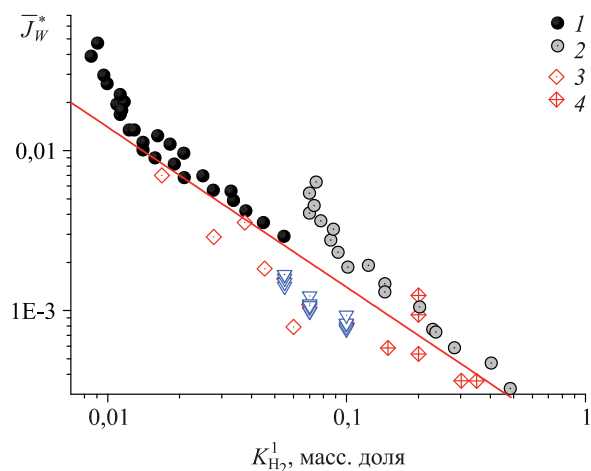


Рис. 17. Диаграмма режимов горения и погасания водорода в пограничном слое.

1, 3 — топливная смесь H_2/N_2 , 2, 4 — смесь H_2/He .

Дополнительные исследования, проведенные при горении водорода, разбавленного гелием, приведенные на данном рисунке, подтверждают этот факт. Кроме того, можно видеть, что процессы воспламенения (светлые точки на рисунке) и погасания (темные точки) подчиняются одной закономерности. Полученные в данные дают основание предположить, что погасание в пограничном слое происходит в условиях, когда фронт пламени приближается к стенке. Это допущение позволяет, используя метод Шваба—Зельдовича, получить аналитическое выражение для условий срыва пламени. Оценка, полученная на основе такого подхода, приведена на рис. 17 в виде сплошной линии.

Программа Ш.16.3. Физико-химические процессы в лазерной и плазменной обработке материалов и в плазмохимических реакторах (координатор докт. физ.-мат. наук А. М. Оришич)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича для прогнозирования режимных параметров и улучшения качества лазерной резки металлов разработана теория силового воздействия потока газа на пленку расплава внутри канала лазерного реза. Результаты расчетов позволили объяснить данные экспериментов при лазерной

резке металлов большой толщины, которые до этого не укладывались в существующие представления.

Используя полученные результаты, можно проектировать сопла для лазерной резки, не прибегая к дорогостоящим экспериментам или сводя их к минимуму. На рис. 18, *a* обозначены кривые силового воздействия на пленку рас-

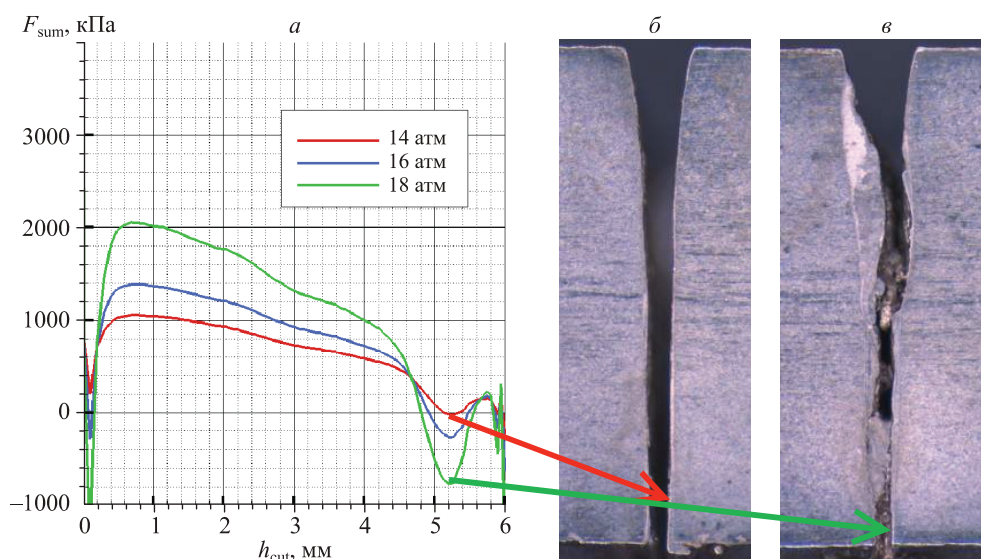


Рис. 18. Рассчитанное для процесса лазерной резки силовое воздействие газа на пленку расплава (*a*). Сечение лазерного реза при давлении вспомогательного газа 14 атм (*б*) и 18 атм (*в*).

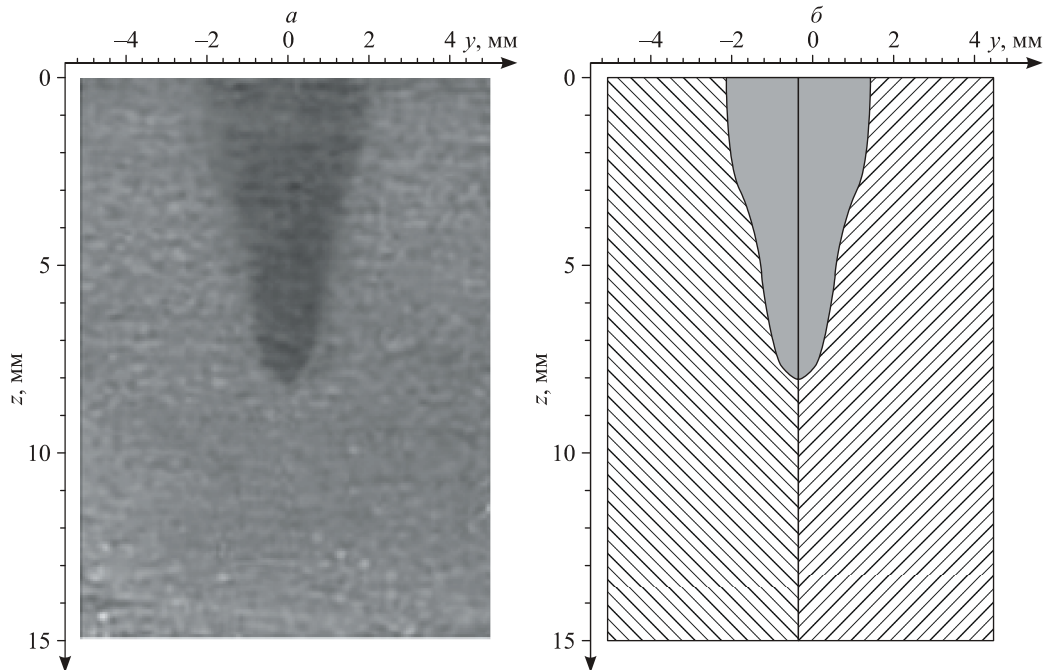


Рис. 19. Продольное сечение сварного шва: эксперимент (а) и расчет (б).

плава (по глубине реза) для давлений азота 14, 16 и 18 атм, а на рис. 18, б и 18, в представлены шлифы лазерного реза для соответствующих давлений.

В том же Институте разработаны 2D и 3D математические модели процессов лазерной сварки однородных и разнородных металлических пластин. Во всех реализованных моделях учитывается образование парового канала в зоне контакта луча лазера с пластинами, наличие ванны с расплавом, двухфазной твердожидкой зоны, охлаждение пластин за счет обдува инертным газом зоны сварки, собственного теплового излучения пластин и другие тепловые процессы в расчетной области. Создан комплекс программ, позволяющий рассчитать основные параметры процесса сварки: глубину проплавления, форму сварного шва, температурные и гидродинамические поля в процессе воздействия лазерного луча и другие величины, знание которых важно с точки зрения технологии лазерной обработки металлов. Показано, что результаты численных расчетов хорошо согласуются с данными экспериментов по морфологии шва, глубине и ширине зоны проплавления (рис. 19).

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича впервые дано физическое обоснование предельным технологическим возможностям лазерной резки металлов с кислородом в качестве технологи-

ческого газа. Установлено, что независимо от мощности лазера максимальная толщина разрезаемого стального листа ограничена толщиной 40—50 мм.

Показано, что для достижения минимальной шероховатости поверхности реза число Пекле должно сохраняться, однако при этом при увеличении толщины разрезаемого металла необходимо снижать скорость резки.

На рис. 20 представлены оптимальные скорость резки и мощность лазера, которые обеспечивают высокое качество резки, характеризованное минимальной шероховатостью поверхности. С уменьшением скорости лазерной

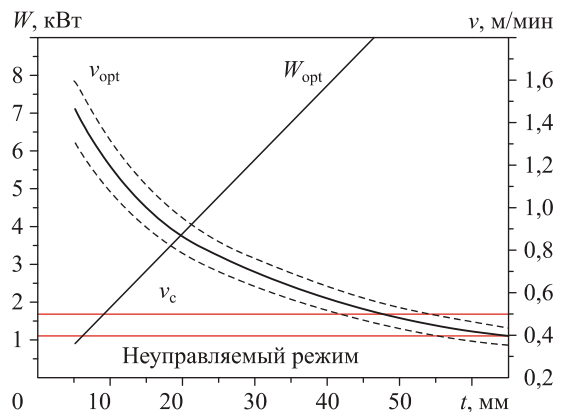


Рис. 20. Зависимость оптимальной скорости резки и мощности лазера от толщины листа. v_c — критическая скорость.

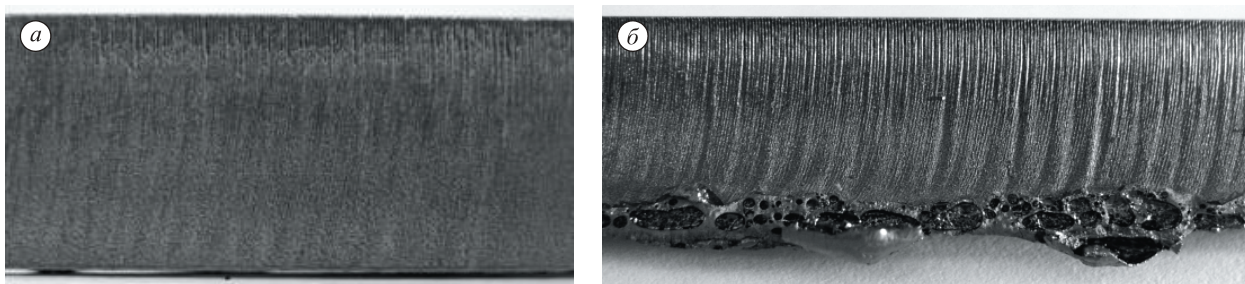


Рис. 21. Иллюстрация качества реза в зависимости от выполнения оптимальности по скорости реза. *a* — качественный рез стали толщиной 16 мм при выполнении условия $v_{\text{opt}} > v_c$; *б* — рез стали толщиной 16 мм с низким качеством при выполнении условия $v_{\text{opt}} < v_c$.

резки до скорости горения происходит резкое увеличение шероховатости. Чтобы получить высокое качество резки с низкой шероховатостью, должно выполняться условие $v_{\text{opt}} > v_c$. Данное условие определяет максимальную толщину стального листа, которую можно разрезать с минимальной шероховатостью, это 40—50 мм.

На рис. 21 приведены фотографии, иллюстрирующие вид разрезанной поверхности в зависимости от выполнения условия оптимальной скорости реза v_{opt} . При неоптимальной скорости реза на нижней кромке образуется «грат».

Сотрудниками этого же Института разработан универсальный электродуговой двухструйный плазмотрон постоянного тока. Плазмотрон обладает жесткой вольт-амперной характеристикой. Коэффициент полезного действия плазмотрона составляет 75 % и может варьироваться в зависимости от расходов плазмообразующего и защитного газов.

Плазмотрон имеет V-образный дуговой канал, на вершинах которого установлены торцевые электроды отделенные от дугового канала защитными секциями (рис. 22). В зазор между электродами и защитными секциями подается инертный газ G_3 , что препятствует проникновению химически активных газов в приэлектродные области электродов. Подача химически активных газов G производится за защитной секцией.

Универсализм плазмотрона обеспечивается возможностью варьирования газодинамикой течения перерабатываемых газов в дуговых каналах в оптимальных пределах. Плазмотрон может применяться для прямого нагрева кислорода и галогенсодержащих газов (F, Cl и их соединений), в частности, в технологиях переработки фторидов, для нагрева $TiCl_4$ в хлоридной технологии получения пигментного диоксида титана и т. д.

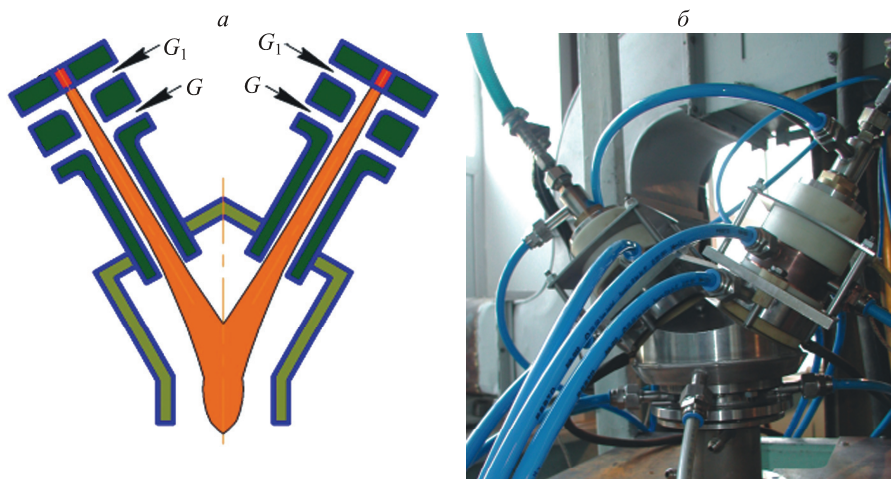


Рис. 22. Схема (а) и фото (б) плазмотрона (мощность до 150 кВт).

Поясн. см. в тексте.