

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. Алексеенко, докт. техн. наук А. П. Бурдуков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кута-таладзе разработан многофункциональный пневматический малогабаритный эжектор (рис. 6) с радиальным выпуском сжатого воздуха и использующий эффект Коанда с коэффициентом эжекции $K > 40$ и дальностью выхлопной струи $\sim 15\text{—}20$ м. Эжектор предназначен для проветривания тупиковых выработок длиной $25\text{—}30$ м при проходке взрывным методом, для предотвращения местных и слоевых скоплений метана, а также для вынужденного проветривания при загромождении штреков транспортными средствами. Для эффективного пылеподавления и орошения стенок забоя используется распыл мелкодисперсного водного аэрозоля с расходом 80 г/с. Уменьшенные массогабаритные характеристики эжектора значительно упрощают его транспортировку и монтаж в тяжелых условиях подземных шахт и рудников. Проведены испытания опытных образцов эжектора пневматического, диффузорного, малогабаритного — ЭПДМ в условиях горных выработок Таштагольского филиала ОАО «Евразруда». Экономический эффект только за счет повышения производительности и снижения стоимости сжатого воздуха при условии двухсменной работы одного эжектора по сравнению с применяющимся эжектором марки ЭДД-120 составляет 65 тыс. р. в год.



Рис. 6. Эжектор ЭПДМ производительностью 22 м³/мин.

В том же Институте совместно с Датским техническим университетом получены новые аналитические решения для двух концепций (Жуковского и Прандтля—Беца) оптимального ротора ветряной турбины с конечным числом лопастей и дано сравнение их эффективности в приложении к ветровым турбинам. Ротор Жуковского оказался производительнее при одинаковой быстроходности колес, а ротор Прандтля—Беца — эффективнее, так как имел большую производительность при одинаковой скорости торможения ветра на колесе (рис. 7). Полученный результат имеет принципиальное значение как для создания оптимальных рабочих колес роторов и статоров, так и для снижения шума, излучаемого турбинами. Дополнительным результатом данных исследований стало возвращение имени Н. Е. Жуковского важному пределу ветроэнергетики — максимальному значению коэффициента использования ветра, известному ранее как предел Беца.

В том же Институте разработано новое горелочное устройство (рис. 8) для сжигания некондиционных углеводородных топлив, не имеющее мировых аналогов. Принцип работы горелки следующий: на начальной стадии горения «плохого» топлива в условиях частичного или полного перекрытия окислителя образуется аэрозольный сажистый факел. Затем перегретый водяной пар повышенного давления, получаемый в минипарогенераторе как составном узле горелки, пронизывает первичный факел, где на кластерах сажистых наночастиц идет разложение молекул водяного пара с образованием химически активного радикала ОН. В результате формируется устойчивый высокотемпературный вторичный экологически чистый факел.

Испытание горелки-демонстратора мощностью 20 кВт с использованием современных

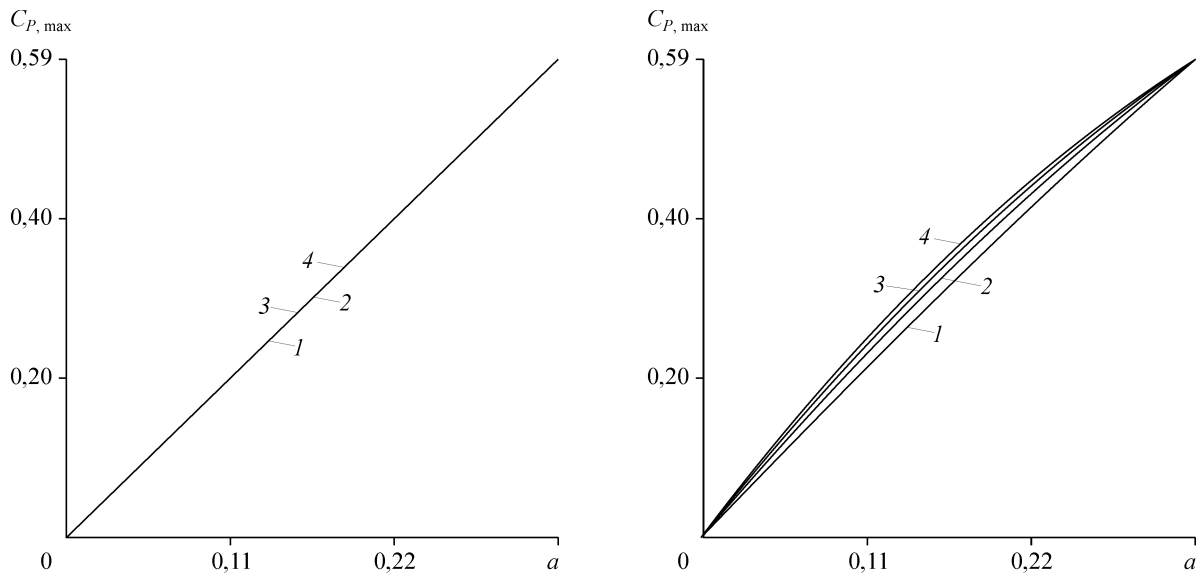


Рис. 7. Коэффициент использования энергии ветра C_p для оптимального ротора как функция потерь скорости ветра на колесе a и числа лопаток N , которое совпадает с номером кривых. Слева — ротор Жуковского, справа — ротор Беца.

диагностик подтвердило наличие в объеме частиц фрактального типа, состоящих из первичных частиц нанометрового диапазона. В ходе испытаний наблюдалось кольцевое свечение в ближней ультрафиолетовой области ОН-радикала вокруг поверхности паровой струи, а также — пульсационное горение сажепарового факела. Выбросы CO, NO в новой горелке в несколько раз ниже, чем в горелке равной мощности ведущей зарубежной фирмы.

Разработан и апробирован новый метод лазерной вспышки для измерения теплопроводности и температуропроводности металлов и сплавов в широком интервале температур жидкого состояния, имеющий ряд преимуществ перед традиционными методиками и существенно расширяющий возможности экспериментальных исследований. С использованием новой методики получены достоверные экспериментальные данные по теплопроводности расплавов чистых индия, олова, свинца и висмута, а также их сплавов в интервале температур от ликвидуса до 1275 К (рис. 9). Получены аппроксимирующие уравнения и таблицы справочных данных для температурной зависимости свойств. Проведено сопоставление результатов измерений с известными литературными данными. Рассчитана температурная зависимость числа Лоренца чистых металлов до 1000 К. Обнаружено изменение свойств нержавеющей стали 12X18H10T при контакте с жидким оловом.

В Институте физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова комплексным методом экспериментально получены зависимости теплопроводности и объемной теплоемкости мерзлых и талых грунтов, песка, супеси и суглинка от влажности при различных концентрациях загрязнения дизельным топливом марки Л-0,2-40 (рис. 10). Показано, что активные центры на поверхности частиц грунта становятся занятыми нефтепродуктами за счет процессов адсорбции и смачивания, вода при

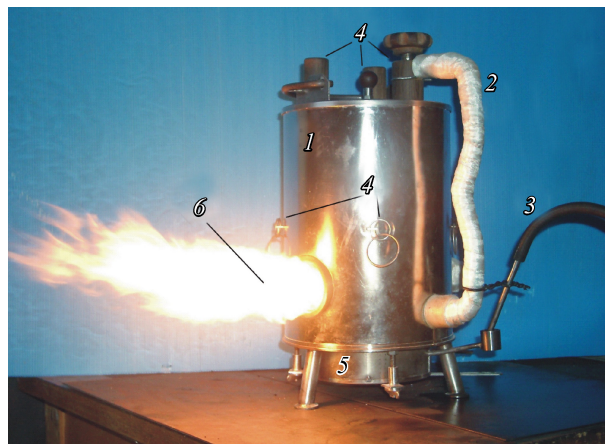


Рис. 8. Горелка-демонстратор мощностью 20 кВт.

1 — корпус из двух цилиндрических обечаек, внутри которых расположен минипарогенератор; 2 — паропровод; 3 — подача топлива; 4 — узлы регулирования горения; 5 — нижняя часть камеры горения; 6 — вторичный факел.

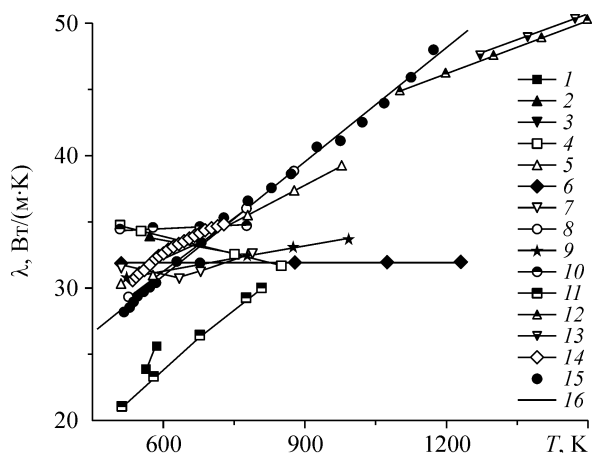


Рис. 9. Теплопроводность жидкого олова λ . 1—14 — данные различных авторов; 15 — данная работа, 16 — аппроксимация.

поступлении в грунт не смачивает минеральные частицы, так как их поверхность становится гидрофобной, причем с увеличением концентрации загрязнения их становится боль-

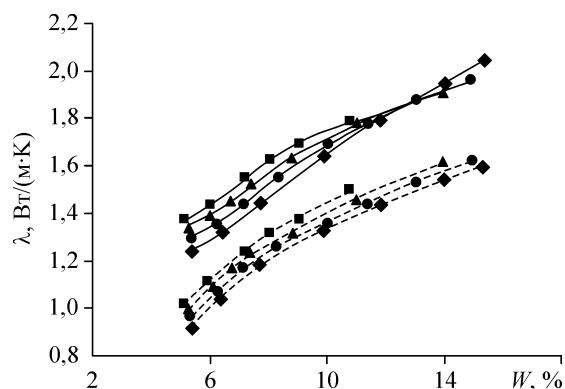


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности λ мерзлого (сплошные линии) и талого (штриховые линии) песка от влагосодержания W при различных концентрациях загрязнения, %: \blacklozenge — 0; \bullet — 5; \blacktriangle — 10; \blacksquare — 15.

ше. Точные значения теплофизических свойств дисперсных материалов важны для прогноза распространения загрязнений в условиях городов на вечной мерзлоте.

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 исследовано влияние отрицательного градиента давления на течение и теплообмен в пограничном слое. Показано, что существует

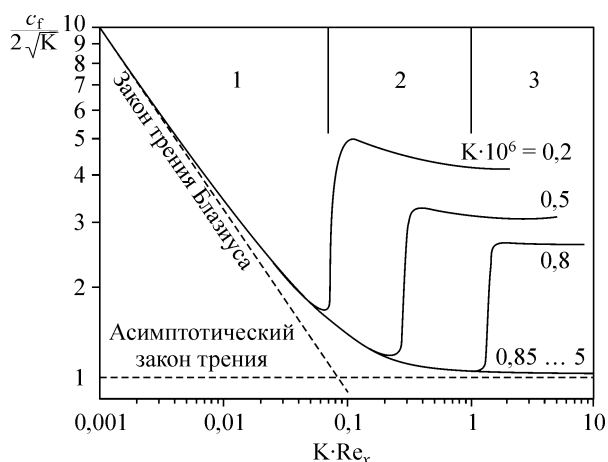


Рис. 11. Области течения с отрицательным градиентом давления: 1 — ламинарное течение; 2 — переходное течение; 3 — асимптотическое течение. $c_f/2$ — коэффициент трения.

аналогия между воздействием на пограничный слой отрицательного градиента давления и отсоса газа через проницаемую поверхность, связанная с наличием в обоих случаях поперечного потока газа, направленного от внешней границы слоя к стенке. На основе результатов численного моделирования пограничного слоя с отрицательным градиентом давления (с ускорением потока) определены границы ламинарной, переходной и асимптотической областей течения (рис. 11). В асимптотической области течения коэффициент трения не зависит от числа Рейнольдса и определяется только значением параметра ускорения Кейса K . Интегральные характеристики пограничного слоя (числа Рейнольдса, построенные по толщине вытеснения Re^* и по толщине потери импульса Re^{**} , формпараметр H) также не зависят от числа Рейнольдса, построенного по длине пластины Re_x .

Показано, что в области значений параметра ускорения Кейса от 0 до $0,8 \cdot 10^{-6}$ возможен ламинарно-турбулентный переход, а при значениях больше $0,85 \cdot 10^{-6}$ течение в погра-

ничном слое остается ламинарным при любых числах Рейнольдса.

В отличие от динамического, характеристики теплового пограничного слоя достаточно консервативны к воздействию отрицательного градиента давления. В асимптотических условиях режим течения сохраняется ламинарным, и теплообмен при этом описывается закономерностями ламинарного пограничного слоя (рис. 12).

В том же Институте с использованием двухлучевого лазерного сканирования впервые получены статистические характеристики потока, построены карты режимов течения, предложена модель перехода к кольцевому течению, определены потери на трение. Установлено, что особенностями газожидкостного течения на микромасштабе являются существенная пространственная неоднородность течения и чередование областей с жидкой и газовой фазами, разделенных межфазными менисками, измерены распределения скоростей жидкой и газовой фаз, длин газовых и жидких пробок, достоверно определены границы режимов течения. Установлено, что основными режимами течения в микроканале являются режим с удлиненными пузырями и кольцевой режим течения. На рис. 13, *а* показаны оптические сигналы для режима с удлиненными пузырями, который наблюдался в диапазоне приведенных скоростей жидкости 0,066—0,407 м/с и газа 0,51—2,35 м/с. Рисунок 13, *б* показывает вероятность попадания длины удлиненного пузыря в интервал гистограммы для микроканала $0,67 \times 2,0$ мм. Установлено, что в диапазоне

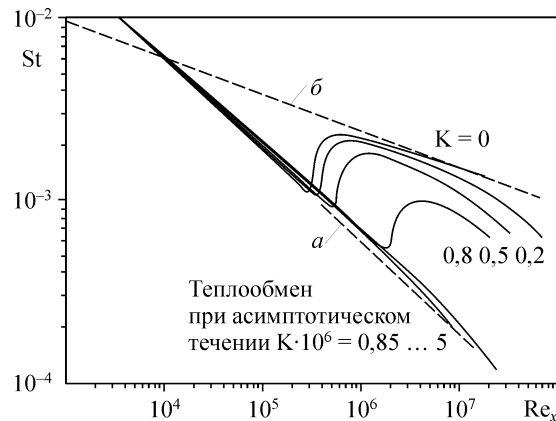


Рис. 12. Теплообмен в ускоренном пограничном слое: закон теплообмена при безградиентном ламинарном (*а*) и турбулентном (*б*) режимах течения. *St* — число Стантона.

приведенных скоростей жидкости распределения длин пузырей-снарядов и жидких перемычек очень узкие и поток характеризуется высокой периодичностью. Для кольцевого течения межфазная неустойчивость приводит к возникновению жидких пробок, и поток характеризуется высокой степенью неравновесности. Полученные закономерности статистических характеристик потока дают важную информацию о структуре течения, необходимую для объяснения закономерностей теплообмена при фазовых превращениях в микроканалах.

Разработан метод лазерной доплеровской визуализации и измерения поля скоростей с подавлением влияния многочастичного рассеяния при использовании технологии Doppler Global Velocimetry (Planar Doppler Velocimet-

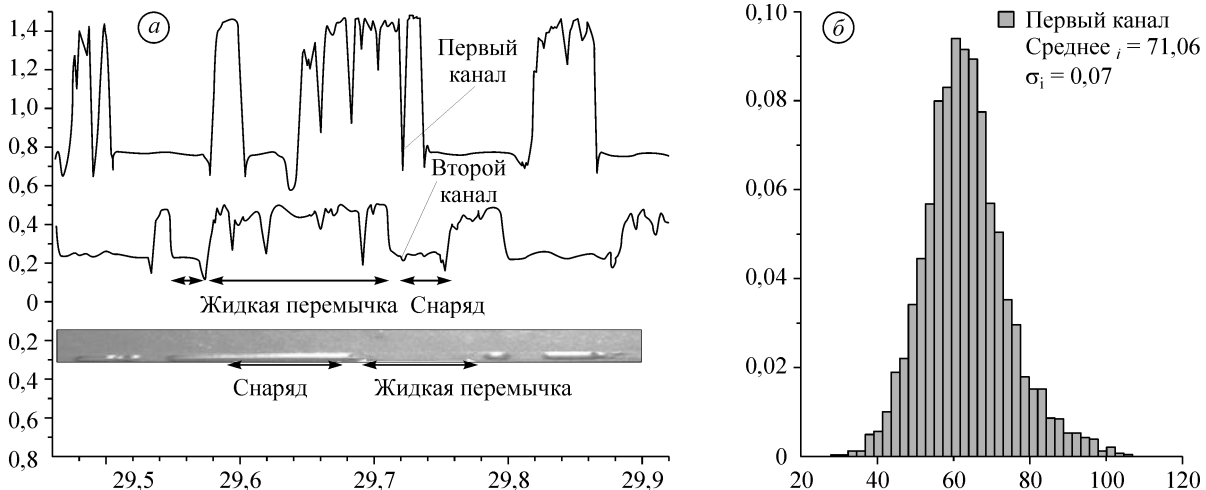
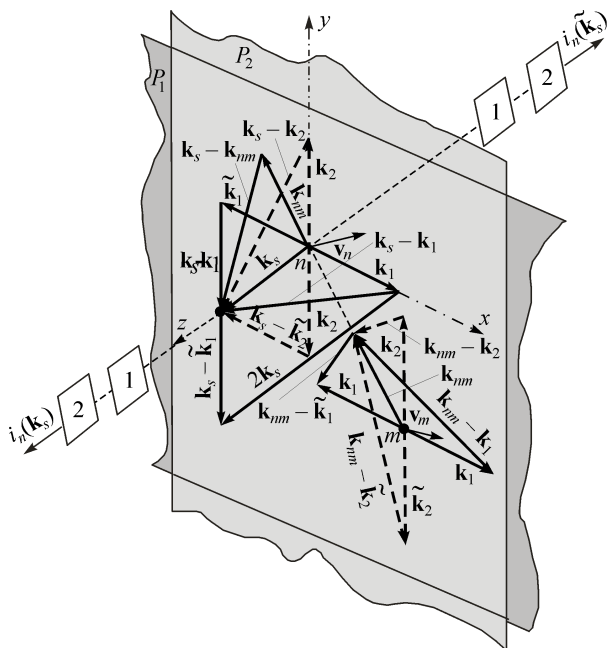


Рис. 13. Оптический сигнал с фотодиода (*а*) и распределение длины удлиненного пузыря-снаряда в интервале гистограммы (*б*).



$$i_n(\mathbf{k}_1) + i_n(\tilde{\mathbf{k}}_1) = 2\xi \mathbf{v}_n \mathbf{k}_1 = 2\xi \omega_{Dx};$$

$$i_n(\mathbf{k}_2) + i_n(\tilde{\mathbf{k}}_2) = 2\xi \mathbf{v}_n \mathbf{k}_2 = 2\xi \omega_{Dy};$$

$$i_n(\mathbf{k}_s) - i_n(\tilde{\mathbf{k}}_s) = 2\xi \mathbf{v}_n \mathbf{k}_s = 2\xi \omega_{Dz}$$

Рис. 14. Конфигурация световых пучков в пространстве волновых векторов, иллюстрирующая измерение поля 3D векторов скоростей с подавлением влияния многочастичного рассеяния.

гу). Координатно-измерительный базис формируется за счет коммутации направлений и частоты пространственно совмещенных лазерных

плоскостей, синхронизированной с работой CCD-камеры. Частоты коммутируемых лазерных пучков, формирующих каждую световую плоскость, согласованы с передаточной функцией конвертора частота/интенсивность. Поле скоростей с исключением вклада многочастичного рассеяния получается из линейных комбинаций нормированных изображений лазерных плоскостей, регистрируемых CCD-камерой в частотно-демодулированном свете. Для визуализации и измерения поля 2D векторов скоростей с подавлением влияния многочастичного рассеяния достаточно одного измерительного канала, содержащего оптический конвертер частота/интенсивность и одну CCD-камеру. При визуализации поля 3D векторов скоростей вводится второй измерительный канал (рис. 14).

Область применения разработанного метода — лазерная диагностика потоков газовых и конденсированных сред и доплеровская спектроскопия световых полей, рассеянных многочастичными динамическими структурами.

Разработан высокоточный лазерный диагностический комплекс «ЛАД-015» (рис. 15), которым оснащен Государственный эталон единицы скорости воздушного потока России (рис. 16) (ВНИИМ, Санкт-Петербург). Это позволило ВНИИМ успешно выполнить Программу международных ключевых сличений национальных эталонов единицы скорости воздушного потока АРМР.М.ФФ-К3, организо-



Рис. 15. Лазерный доплеровский диагностический комплекс «ЛАД-015».



Рис. 16. Государственный специальный эталон единицы скорости воздушного потока ГЭТ-150-85, оснащенный лазерным доплеровским диагностическим комплексом «ЛАД-015».

ванных межрегиональной метрологической организацией «Азиатско-Тихоокеанская метрологическая программа» (АРМР). В сличени-

ях сравнивались эталоны шести стран — Японии, Кореи, России, Сингапура, США и Тайваня.

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 впервые выполнены измерения коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера в процессе лазерной резки для больших толщин 3—16 мм (рис. 17). Прошедшее излучение направлялось на приемник-измеритель мощности OPHIR 5000W-CAL-SH. При этом специально контролировались размер и отклонение лазерного луча при взаимодействии с материалом в процессе реза. Продукты горения металла сдувались струей воздуха и их попадание на приемник исключалось. Показано, что численное моделирование процесса поглощения, основанное на использовании формул Френеля, дающее значение 30—50 %, неправильно описывает процесс взаимодействия излучения с материалами в узкой щели лазерного реза. Реальные значения коэффициента поглощения излучения существенно больше и достигают 70—80 % (рис. 18).

Впервые на основе мощного непрерывного CO_2 -лазера создан технологический импульсно-периодический лазер с частотами до 80 кГц и мощностью излучения до 5 кВт с использованием метода модуляции добротности диском со щелями (рис. 19). Особенностью предлагаемой конструкции является то, что узел модуляции расположен внутри рабочего объема лазера. Система модуляции добротности позволяет изменять в широком диапазоне частоту следования импульсов, скважность, форму импульса генерации за счет изменения частоты вращения диска, ширины щели, количества щелей и состава смеси рабочих газов (рис. 20).

Зависимость средней мощности генерации от мощности разряда накачки для разработанного лазера (рис. 21) демонстрирует высокие генерационные характеристики импульсно-периодического режима — на частоте 72 кГц средняя мощность генерации отличается от генерации в непрерывном режиме не более чем на 10 %.

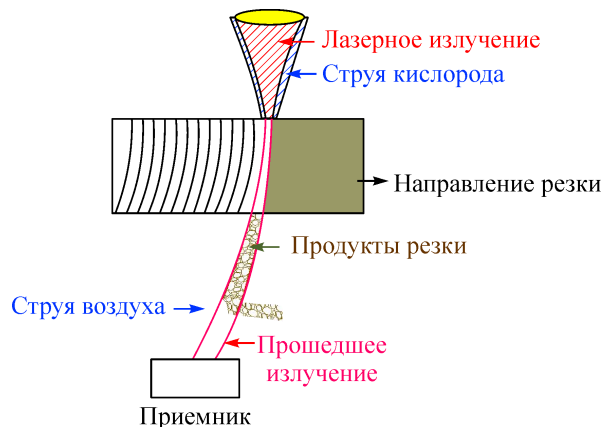


Рис. 17. Схема лазерной резки толстой пластины.

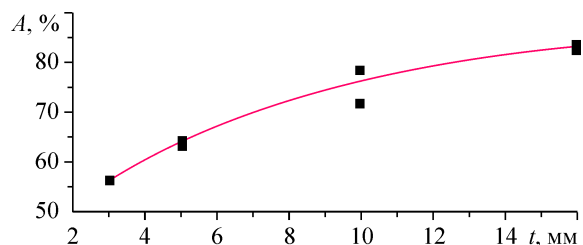


Рис. 18. Результаты измерений коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера в процессе лазерной резки для больших толщин пластины.

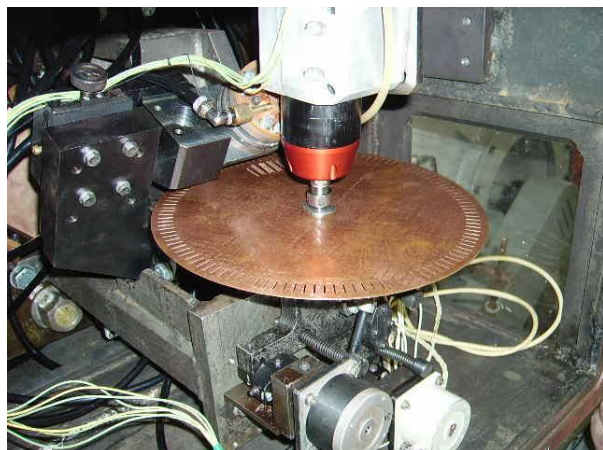


Рис. 19. Внешний вид узла модуляции.

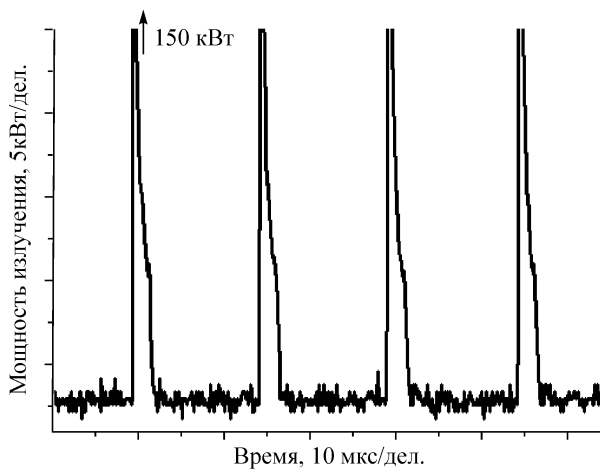


Рис. 20. Осциллограммы генерации. Форма периодического процесса.

Предложены пути решения фундаментальной проблемы, связанной с определением законов подобия лазерной резки металла, формулированием безразмерных параметров и нахождением их критических значений, определяющих условие качественного реза. Впервые оптимизация процессов лазерной резки проводится на основе четких количественных показателей: измеренных значений шероховатости поверхности и минимизации зоны термическо-

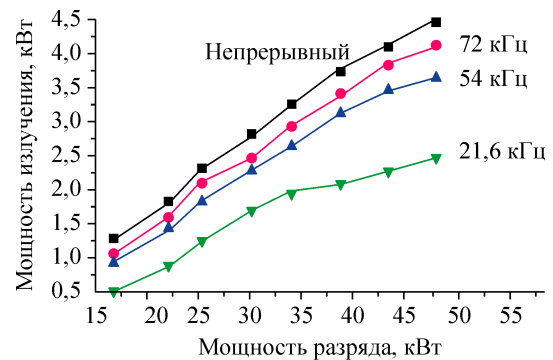


Рис. 21. Зависимости мощности генерации лазера от мощности разряда для непрерывного режима и работы в импульсно-периодическом режиме.

го влияния за счет баланса мощности излучения и скорости реза при использовании кислорода в качестве активного газа.

Экспериментально показано, что введение специально подготовленных наноразмерных порошков тугоплавких соединений в количестве менее 0,1 % по массе в зону сварного соединения при CO_2 -лазерной сварке пластин из титанового сплава приводит к повышению дисперсности кристаллического зерна, значительному повышению пластичности и стойкости к циклическим нагрузкам.