

Study of Shock-Heated Gases Characteristics on the EKUD Experimental Complex

P. V. Kozlov¹, I. E. Zabelinskii¹, N. G. Bykova¹, V. Yu. Levashov¹,
G. Ya. Gerasimov¹, M. A. Kotov²

¹*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

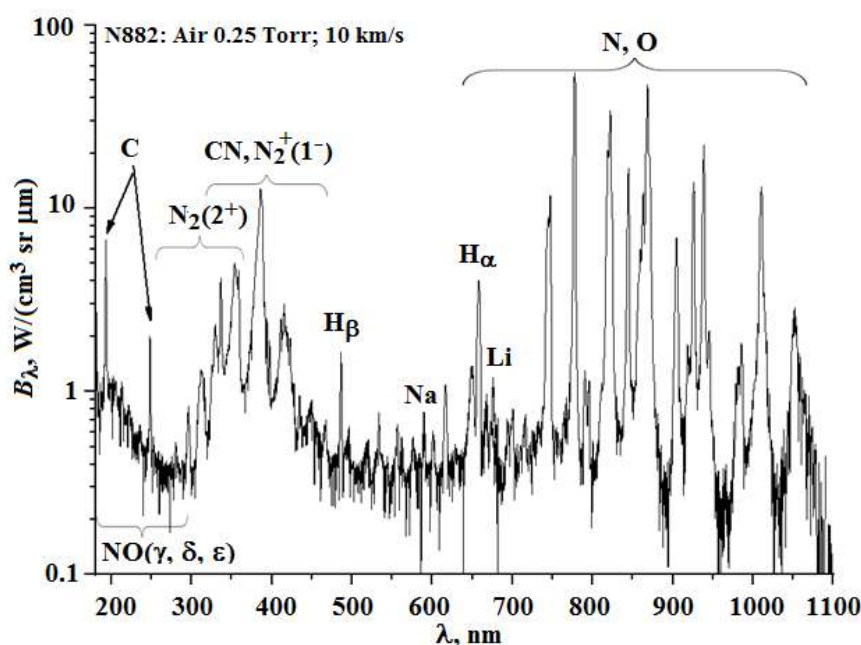
²*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia*

vyl69@mail.ru

Abstract

The results of studies conducted at the experimental complex EKUD of the Institute of Mechanics (M.V. Lomonosov Moscow State University) over the past ten years are analyzed. These primarily include the radiation characteristics of shock-heated gases measured in a wide range of wavelengths ($\lambda = 115 \div 1100$ nm) at shock wave velocities up to 11.4 km/s and a gas pressure in front of the shock wave of 0.25 Torr, as well as the ignition characteristics of combustible mixtures based on hydrogen, propane and propylene obtained both at low ($T \leq 1000$ K) and high ($T \geq 1000$ K) temperatures. Electron concentrations in low-temperature plasma in the vicinity of a strong shock wave were measured.

Key words: shock waves, radiation, combustible mixtures, ignition delay time, electron concentration.



Panoramic emission spectrum of shock-heated air in the ultraviolet, visible and infrared spectral regions at $p_0 = 0.25$ Torr and $V_{SW} = 10$ km/s

УДК 533.9: 543.4

Исследование характеристик ударно нагретых газов на экспериментальном комплексе ЭКУД

П. В. Козлов¹, И. Е. Забелинский¹, Н. Г. Быкова¹, В. Ю. Левашов¹,
Г. Я. Герасимов¹, М. А. Котов²

¹НИИ Механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1

²Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

vyl69@mail.ru

Аннотация

Анализируются результаты исследований, проведенных на экспериментальном комплексе ЭКУД Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова за последние десять лет. К ним в первую очередь относятся радиационные характеристики ударно нагретых газов, измеренные в широком диапазоне длин волн ($\lambda = 115 \div 1100$ нм) при скоростях ударной волны до 11.4 км/с и давлении газа перед ударной волной 0.25 Торр, а также характеристики воспламенения горючих смесей на основе водорода, пропана и пропилена, полученные как при низких ($T \leq 1000$ К), так и при высоких ($T \geq 1000$ К) температурах. Измерены концентрации электронов в низкотемпературной плазме в окрестности сильной ударной волной.

Ключевые слова: ударные волны, излучение, горючие смеси, время задержки воспламенения, концентрация электронов.

1. Введение

Ударные трубы являются традиционным инструментом для изучения неравновесных физико-химических процессов в высокотемпературных газах [1]. В настоящее время в мировой практике задействовано большое количество ударных труб, отличающихся друг от друга размерами, конструкцией и целью проводимых исследований [2]. Основной объем экспериментальных исследований, проведенных на ударных трубах, включает измерение радиационных характеристик ударно нагретых газов [3–6], определение констант скоростей химических реакций [7, 8] и измерение времен задержки воспламенения в различных высокотемпературных горючих смесях [9–11].

Информация по излучению ударно нагретых газовых смесей, которая является результатом обработки экспериментальных данных, полученных на ударных трубах, используется как для оценки тепловых потоков к поверхности спускаемых космических аппаратов, движущихся в атмосфере Земли, так и для тестирования различного рода компьютерных моделей, способных предсказать поведение высокотемпературной газовой среды за фронтом отошедшей ударной волны вблизи поверхности аппарата [12]. С другой стороны, экспериментальные данные по измерению времен задержки воспламенения горючих смесей в широком диапазоне изменения температур и давлений используются для улучшения характеристик процесса тепловыделения при горении топливных смесей в камерах сгорания различного рода двигателей, а также для снижения неблагоприятного воздействия работы двигателей на атмосферу [13].

В настоящей работе анализируются результаты исследований, проведенных на экспериментальном комплексе ЭКУД Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова за последние десять лет, которые связаны как с изучением радиационных характеристик ударно нагретых газов, так и с определением времен задержки воспламенения различных горючих смесей при высоких температурах.

2. Описание экспериментального комплекса

Экспериментальный комплекс ЭКУД [14] состоит из трех ударных труб. Двух-диафрагменная ударная труба DDST-M и стандартная ударная труба STS-M используются для исследования радиационных свойств высокотемпературных газов за сильными ударными волнами. С помощью метрологической ударной трубы STM изучается процесс воспламенения различных горючих смесей.

Модернизированная двух-диафрагменная ударная труба DDST-M предназначена для измерения спектральных характеристик ударно нагретых газов в интервале длин волн $\lambda = 190 \div 1100$ нм, который соответствует ультрафиолетовому (UV), видимому (VIS) и инфракрасному (IR) спектральным диапазонам. Труба имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром 50 мм, в которой инициирование ударной волны осуществляется за счет детонационного сжигания стехиометрической смеси кислорода с водородом, разбавленной гелием. Установка состоит из трех камер: камеры высокого давления (КВД) длиной 1.55 м, камеры промежуточного давления (КПД) длиной 3.5 м и камеры низкого давления (КНД) длиной 3 м. В качестве диафрагмы между КВД и КПД используется медная фольга толщиной 300 мкм с насечками. Камера промежуточного давления заполнена гелием, а камера низкого давления – исследуемой газовой смесью. В качестве диафрагмы между КПД и КНД используется медная фольга толщиной 400 мкм с насечками. Вдоль секций ударной трубы расположены пьезоэлектрические датчики для осуществления контроля за давлением газа и скоростью ударной волны в каждой секции. Общий вид ударной трубы DDST-M приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид двух-диафрагменной экспериментальной установки DDST-M по измерению излучения ударно нагретого газа

Система регистрации излучения на ударной трубе DDST-M позволяет измерять радиационные характеристики ударно нагретого газа, проходящего мимо двух измерительных сечений трубы. Схема измерительной системы приведена на рис. 2. Первый измерительный канал, регистрирующий интегральную по времени плотность излучения газа (панорамный спектр) в UV/VIS спектральном диапазоне ($\lambda = 190 \div 670$ нм), включает спектрограф Horiba CP140-1824 и линейный CDD-детектор Hamamatsu S11156. Одновременно в этом же измерительном сечении с помощью спектрографа Horiba CP104-1603 регистрируется панорамный спектр в VIS/IR диапазоне ($\lambda = 500 \div 1100$ нм). Второй измерительный канал собран на базе спектрографов B&M50 и Horiba H1061, которые фиксируют осциллограммы излучения на ФЭУ R4420 Hamamatsu и ФЭУ R446 Hamamatsu, соответственно. Этот измерительный канал регистрирует временную эволюцию излучения в двух специально выделенных с помощью монохроматоров узких спектральных диапазонах. Спектрограф B&M50 вместо регистрации временной эволюции излучения может проводить измерение интегральных по времени спектров излучения на ICCD камеру в одном из спектральных поддиапазонов ($\lambda = 200 \div 420$, $405 \div 635$ и $625 \div 850$ нм).

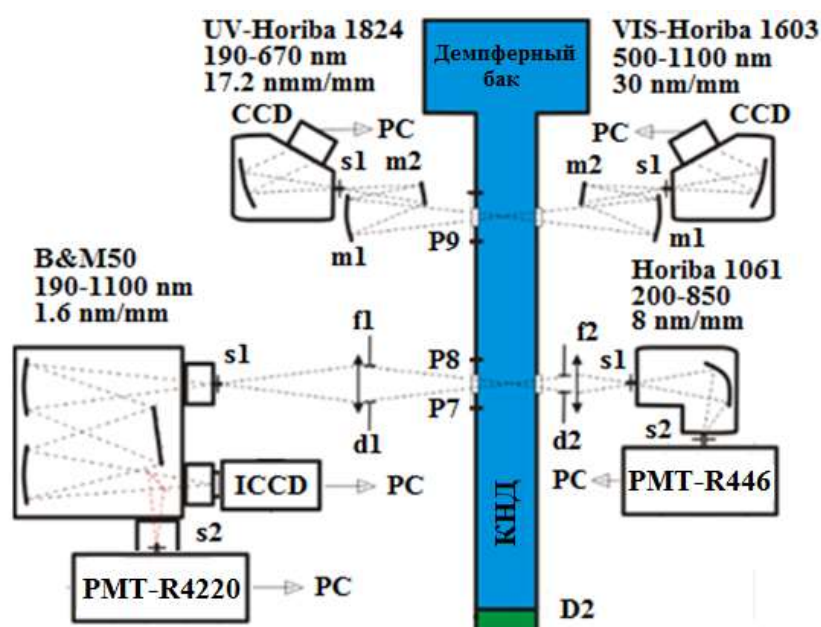


Рис. 2. Система регистрации излучения на установке DDST-M

Модифицированная стандартная (одно-диафрагменная) ударная труба STS-M состоит из двух камер (КВД и КНД) и работает на том же принципе, что и ударная труба DDST-M. Камера низкого давления длиной 4 м состоит из трёх секций, сочлененных фланцами: разгонной секции длиной 2.5 м и двух измерительных секций длиной 0.5 м каждая. Вторая измерительная секция соединяет камеру низкого давления с расширительным баком объёмом 80 литров. Длина камеры высокого давления равна 0.7 м. Внутренний диаметр ударной трубы по всей ее длине одинаков и составляет 5 см, толщина стенок трубы равна 2.5 см. Между КВД и КНД устанавливается кассета с медной диафрагмой с насечками толщиной $0.13 \div 0.31$ мм. Схематичное изображение установки STS-M и системы регистрации излучения на ней приведено на рис. 3.

Важной особенностью ударной трубы STS-M является то, что ее измерительная аппаратура позволяет фиксировать спектральные характеристики ударно нагретых газов в интервале длин волн $\lambda = 115 \div 200$ нм, который соответствует области вакуумного ультрафиолета (VUV). Данный спектральный диапазон является одним из основных при определении радиационных характеристик ударно нагретого воздуха. С одной стороны, излучение в VUV диа-

пазоне составляет значительную часть общего радиационного теплового потока к поверхности спускаемого аппарата [15]. С другой стороны, этот диапазон вносит наибольшую неопределенность в оценку радиационного теплопереноса, что объясняется недостатком экспериментальной информации в данной спектральной области [16]. Одной из причин отсутствия достаточного количества экспериментальных данных является сложность измерения VUV излучения, связанная с необходимостью удаления молекулярного кислорода и водяного пара из оптического пути при регистрации излучения в рассматриваемом диапазоне [17].

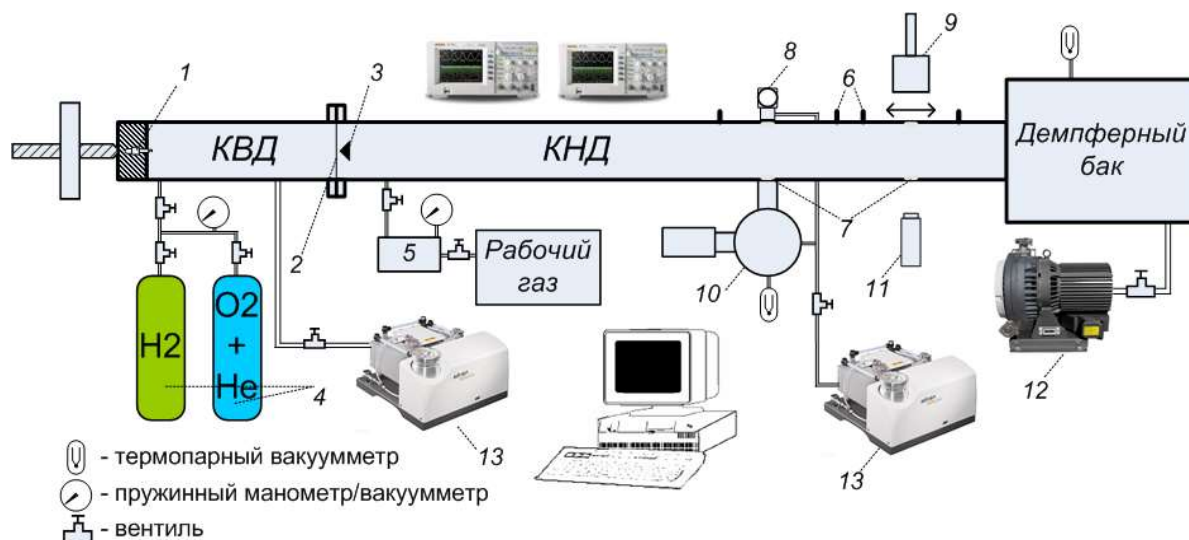


Рис. 3. Схема системы регистрации излучения экспериментальной установки STS-M: 1 – свеча; 2 – диафрагма; 3 – ножи; 4 – баллоны с газом высокого давления; 5 – промежуточная мерная емкость для рабочего газа; 6 – пьезодатчики; 7 – оптические окна; 8 – дейтериевая лампа; 9 – оптическая система видимого диапазона; 10 – оптическая система VUV диапазона; 11 – лазер, дейтериевая или ртутная лампа; 12 – диффузионный насос; 13 – турбомолекулярный насос

Модификация исходных ударных труб DDST и STS заключается в том, что в их конструкцию включен дополнительный элемент – форкамера, который отделяет торцевую стенку трубы с поджигающим устройством от основного объема КВД перфорированным диском, имеющим 19 микро-сопловых отверстий. Это повышает энергетическую эффективность установок, в первую очередь, за счет организации более полного сгорания горючей смеси в КВД, и позволяет получать более высокие скорости ударной волны в КНД при прочих равных условиях [18]. Известно, что обычные ударные установки, работающие на детонационном горении, генерируют ударные волны в КНД со скоростями не выше $7 \div 8$ км/с [2]. Более эффективный детонационный процесс, реализуемый за счет наличия форкамеры в конструкции установок, увеличивает скорость ударной волны до 11.4 км/с на двух-диафрагменной ударной трубе DDST-M и до 10.0 км/с на одно-диафрагменной стандартной ударной трубе STS-M при начальном давлении в КНД, равном 0.25 Торр. Дополнительно решается ряд технических проблем таких, как практически полная повторяемость выбранных режимов и защита поджигающего устройства от воздействия отраженной от диафрагмы ударной волны.

Для получения спектральных характеристик излучения в абсолютных энергетических единицах проводилась предварительная калибровка измерительных систем установок DDST-M и STS-M. Процедура калибровки состоит в сравнении излучения ударно нагретого газа с излучением эталона (вольфрамовых и дейтериевых ламп). Для сравнения результатов, полученных на ударных трубах разного диаметра, получаемое значение энергетической яркости нужно разделить на диаметр ударной трубы. Таким образом, экспериментальные результаты по излучению ударно нагретого газа представляются в виде объемной плотности энергии излучения J_λ в единицах Дж/(м³·с·рмкм). Более подробно процедура калибровки системы регистрации приведена в [19]. Для перехода в панорамном спектре от объемной плотности

энергии излучения J_λ к объемной мощности излучения B_λ , обычно измеряемой в единицах Вт/(см³·ср·мкм), необходимо величину J_λ разделить на эффективное время излучения $\Delta\tau$ (мкс) в каждом узком диапазоне спектра. Данная процедура требует информации по временным характеристикам излучения отдельных спектральных линий и подробно описана в [20, 21] для различных спектральных диапазонов.

Эксперименты по воспламенению горючих смесей за падающей и отраженной ударной волной, а также исследование воздействия сильной ударной волны на графитовую поверхность проводились на одно-диафрагменной ударной трубе STM. Схематичное изображение экспериментальной установки и ее измерительной системы приведено на рис. 4. Внутренний диаметр трубы составляет 57 мм, длина КВД и КНД равна, соответственно, 1.0 и 3.7 м. Между камерами устанавливается медная диафрагма D с калиброванными насечками. Варьируя толщину диафрагмы, глубину насечек и давления в КВД и КНД, можно достичь необходимых условий газовой среды за ударной отраженной волной.

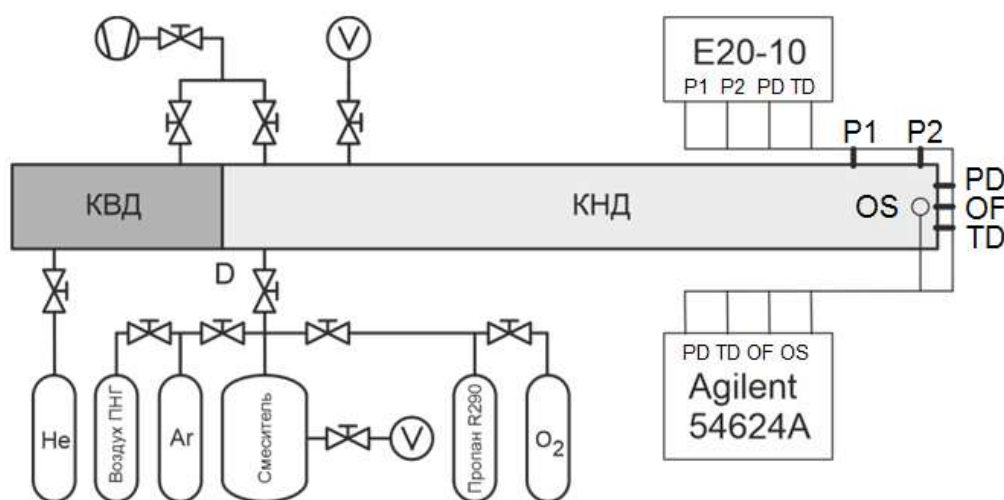


Рис. 4. Схема экспериментальной установки SMT по исследованию воспламенения горючих смесей за падающей и отраженной ударной волной

Измерительная система установки SMT состоит из датчиков давления P1, P2 и PD (PCB113B24), термоэлектрического детектора TD, а также оптической системы OS и светодиода OF, которые настроены на определенные длины волн излучения ударно нагретого газа. Пьезоэлектрические датчики давления P1 и P2 расположены на боковой поверхности трубы на расстоянии 50 мм друг от друга и служат для измерения скорости падающей ударной волны. Датчик давления PD располагается на торцевой стенке трубы на расстоянии 15 мм выше оси трубы и позволяет определять момент прихода ударной волны к торцу трубы, измерять давление за отраженной ударной волной и регистрировать момент воспламенения смеси. Термоэлектрический детектор TD расположен на торцевой стенке трубы симметрично датчику давления PD относительно осевой линии трубы. В ходе эксперимента показания датчиков P1, P2, PD и TD регистрировались аналого-цифровым преобразователем E20-10 (L-Card) с частотой 2.5 МГц на канал, а показания датчиков PD, TD, OF и оптической системы OS регистрировались осциллографом Agilent 54624A в диапазоне 10 ÷ 100 МГц на канал.

Термоэлектрический детектор TD, разработанный для измерения тепловых потоков и показавший хорошие результаты в экспериментах с отраженной ударной волной малой интенсивности [22], впервые успешно применен на ударной трубе IST для регистрации параметров воспламенения горючих смесей за отраженной ударной волной [23]. В процессе экспериментов показано, что время отклика TD на резкое тепловое возмущение, вызванное приходом падающей ударной волны или началом воспламенения горючей смеси, меньше по сравнению с высокочастотным датчиком давления. Характер инерционности прибора позволяет регистрировать зависимость теплового потока от времени в масштабе десятых долей

микросекунды. Температурные градиенты, зафиксированные в процессе измерений, достигали 7 МВт/м^2 в течение 0.5 мкс, причем начало фронтов подъема идеально совпадает с показаниями датчика давления. Показания TD позволяют уточнить время задержки воспламенения пропан-воздушной смеси, особенно при повышенных температурах, когда время задержки воспламенения составляет величину порядка нескольких микросекунд.

Оптическая система OS служит для регистрации временного профиля и спектрального распределения излучения газа через кварцевые окна. Оптическая ось системы располагается перпендикулярно к боковой поверхности трубы на расстоянии 7 мм от ее торца. Монохроматор MC-300 позволяет регистрировать профиль излучения с пространственным разрешением 1.5 мм. Секция регистрации спектрального распределения излучения фиксирует интегральную по времени плотность излучения газа (панорамный спектр) в диапазоне длин волн $\lambda = 190 \div 670$ нм на линейном CCD-детекторе Hamamatsu S11156, установленном на выходе спектрографа Horiba-1603. Световод OF расположен в центре торцевой стенки трубы и позволяет регистрировать излучение на ФЭУ (PMT100). После световода перед ФЭУ устанавливаются интерференционные фильтры на определенные длины волн.

3. Радиационные характеристики ударно нагретых газов

В результате исследований, проведенных на ударных установках DDST-M и STS-M за последние десять лет, получено большое количество экспериментальной информации по радиационным характеристикам ударно нагретых газов в широком интервале длин волн ($\lambda = 115 \div 1100$ нм). Спектральный диапазон, соответствующий VUV области ($\lambda = 115 \div 200$ нм), был исследован на ударной трубе STS-M, которая оснащена соответствующей вакуумной аппаратурой для предотвращения поглощения коротковолнового излучения при его прохождении через монохроматор и соединительные каналы. Получены данные по интегральным по времени разверткам излучения (панорамным спектрам) и временным зависимостям интенсивности излучения отдельных спектральных линий в чистом аргоне [24–27], молекулярном кислороде [28, 29], воздухе [6, 18, 30–35] и смеси CO_2/N_2 , моделирующей атмосферу Марса [36].

Низкотемпературная аргоновая плазма является удобным объектом для тестирования различных моделей излучения ударно нагретых газов [37]. С одной стороны, аргон в качестве примеси входит в состав атмосферного воздуха. С другой стороны, отсутствие у аргона внутренних степеней свободы (вращательных и колебательных), а также процессов диссоциации позволяет установить ведущие физические процессы за фронтом сильной ударной волны, связанные с ионизацией и возбуждением энергетических уровней атомов и ионов при высоких температурах [38]. Излучение чистого аргона за фронтом сильной ударной волны измерялось в диапазоне скоростей ударной волны $V_{SW} = 4.6 \div 8.3$ км/с и начальных давлений газа $p_0 = 0.25 \div 5$ Торр [24–27].

На рис. 5 приведен панорамный спектр излучения в спектральном интервале $\lambda = 190 \div 1100$ нм [25]. Панорамные спектры дают представление об интенсивности излучения ударно нагретого газа на различных участках спектра в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа и являются основой как для оценки радиационного нагрева поверхности спускаемых космических аппаратов, так и для тестирования разрабатываемых радиационно-столкновительных моделей излучающего газа [12]. Как видно из рис. 5, излучение аргона состоит из линейчатого спектра атомов и ионов, и непрерывного фона, включающего тормозное и фото-рекомбинационное излучение электронов низкотемпературной плазмы. Максимальная интенсивность излучения фона в рассматриваемом случае находится в спектральном диапазоне $\lambda = 400 \div 500$ нм, а максимум излучения линейчатого спектра приходится на диапазон $\lambda = 700 \div 950$ нм.

Эксперименты на ударных трубах DDST-M и STS-M позволяют измерить временную зависимость излучения на определенной длине волны, вернее, в узком спектральном диапазоне.

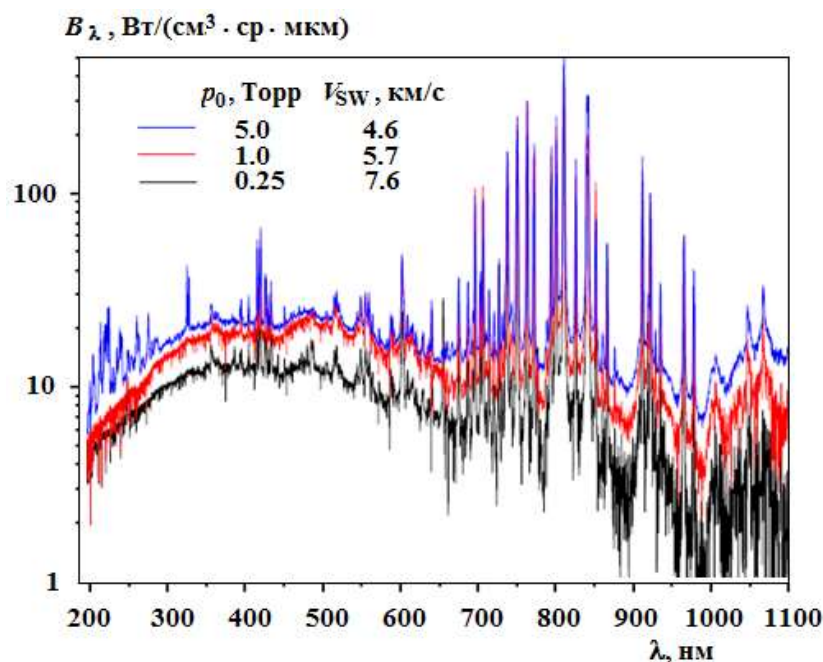


Рис. 5. Панорамный спектр излучения ударно нагретого аргона при различных начальных давлениях и скоростях ударной волны [25]

Измерение этих зависимостей проводится с использованием той же аппаратуры, которая регистрирует панорамные спектры излучения. Временные зависимости представляют особую ценность для тестирования моделей физической и химической кинетики возбуждения и дезактивации электронно-возбужденных состояний, ответственных за испускание излучения на соответствующих длинах волн [12]. Они также позволяют определить эффективное время излучения $\Delta\tau$ на определенной длине волны, которое служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения I_λ на объемную мощность излучения B_λ , обычно измеряемую в единицах $\text{Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$ [33].

На рис. 6 приведен пример временной спектрограммы излучения аргона на длине волны $\lambda = 740$ нм (VIS спектральный интервал) [27].

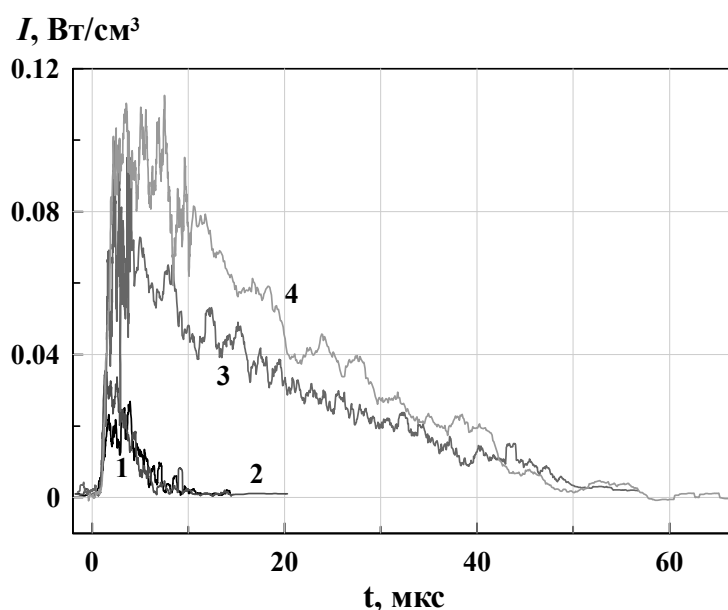


Рис. 6. Временные осциллограммы излучения линии 750 нм атома аргона при $p_0 = 0.25$ Торр и $V = 8.33$ (1), 8.47 (2) км/с; $p_0 = 5.0$ Торр и $V = 4.67$ (3), 4.85 (4) км/с [27]

Эта линия описывает переход с уровня $3s^23p^5(^2P^{\circ}_{1/2})4p$ (энергия уровня 13.481 эВ) на уровень $3s^23p^5(^2P^{\circ}_{1/2})4s$ (энергия уровня 11.828 эВ) и имеет интенсивность излучения, намного превышающую интенсивность фонового излучения, как это видно из рис. 5. На всех осциллограммах нулевое значение времени соответствует положению газодинамического фронта ударной волны, определяемого с точностью 20 нс. Ширина спектральной полосы, регистрируемой в экспериментах, составляет 0.22 нм. Видно, что длительность излучения линии за фронтом ударной волны, а также его максимальное значение увеличиваются с увеличением начального давления. Скорость ударной волны не играет такую важную роль, как давление, потому что в приведенных данных с увеличением давления скорость ударной волны уменьшается. Тем не менее, как видно из сравнения осциллограмм, полученных при одном и том же давлении, снижение скорости ударной волны приводит к уменьшению максимального значения интенсивности излучения.

Экспериментальные данные по излучению молекулярного кислорода за фронтом падающей ударной волны получены в диапазоне скоростей ударной волны $V_{SH} = 5.7 \div 7.8$ км/с при давлении газа перед фронтом ударной волны $p_0 = 1.0$ Торр и $V_{SH} = 8.1 \div 10.0$ км/с при $p_0 = 0.25$ Торр [28, 29]. Молекулярный кислород в отличие от одноатомных газов таких, как, например, аргон, имеет внутренние степени свободы (вращательные и колебательные), что усложняет общую картину переходов между различными электронными состояниями. Доминирующей в спектре излучения молекулярного кислорода является система Шумана – Рунге, которая описывается электронным переходом $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$. Дискретные полосы этого перехода наблюдаются в области длин волн $\lambda = 190 \div 400$ нм. Излучение в этом спектральном диапазоне обусловлено значительной заселенностью состояния $B^3\Sigma_u^-$ непосредственно за фронтом ударной волны и его малым временем жизни, а также тем фактом, что молекулы кислорода не успевают полностью диссоциировать за время наблюдения.

На рис. 7 приведены интегральные по времени развертки излучения (панорамные спектры) в интервале длин волн $\lambda = 190 \div 675$ нм (UV и VIS диапазон) [29]. Видно, что с увеличением скорости ударной волны и, соответственно, с повышением температуры ударно нагретого газа интенсивность переходов в системе полос Шумана – Рунге сильно возрастает, особенно в длинноволновой области, что ведет к выполаживанию спектральной кривой. Это наблюдается уже при скорости ударной волны $V_{SW} = 7.35$ км/с и начальном давлении в камере низкого давления $p_0 = 1$ Торр (см. рис. 7, а).

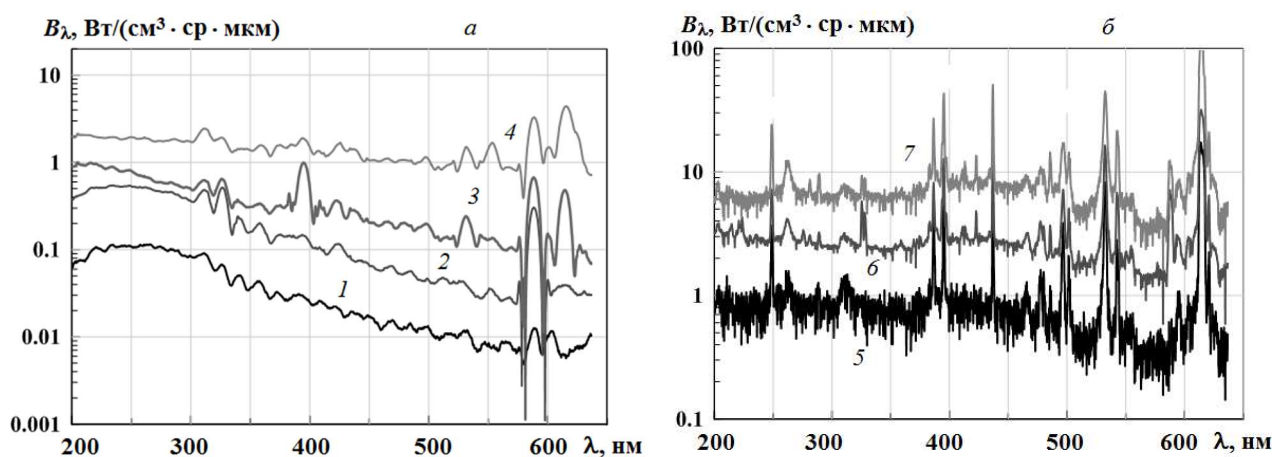


Рис. 7. Панорамные спектры излучения ударно нагретого кислорода при $p_0 = 1.0$ (а) и 0.25 (б) Торр: а – $V_{SW} = 5.68$ (1), 6.14 (2), 7.14 (3) и 7.35 (4) км/с; б – $V_{SW} = 8.06$ (5), 8.77 (6) и 10.00 (7) км/с [29]

Дальнейшее повышение V_{SW} ведет к появлению в спектре интенсивных атомных полос. Это хорошо видно из рис. 7, б, где показаны панорамные спектры ударно нагретого кислорода, полученные при давлении газа перед фронтом ударной волны $p_0 = 0.25$ Торр. Наиболее

интенсивное свечение атомарного кислорода наблюдается на длинах волн $\lambda = 297, 382, 394, 423, 436, 496, 532, 615$ и 645 нм. Переходы из возбужденных состояний атома О в основное являются, как правило, коротковолновыми и лежат в области вакуумного ультрафиолета.

Временные зависимости интенсивности излучения молекулярного кислорода на длине волны $\lambda = 213$ нм, которая является типичной в системе полос Шумана – Рунге, приведены на рис. 8. Видно, что с увеличением скорости ударной волны интенсивность излучения возрастает, особенно в неравновесной зоне, которая характеризуется резким всплеском излучения и лежит в рамках временного интервала $0 \div 0.5$ мкс. Выход интенсивности излучения на равновесное значение наблюдается лишь при $V_{SW} \leq 6.67$ км/с, как это видно из рис. 8, а. При более высоких значениях V_{SW} равновесная зона излучения вообще отсутствует, что говорит о неравновесном характере переходов в системе полос Шумана – Рунге при скоростях ударной волны $V_{SW} \geq 7.50$ км/с. При этом, как видно из рис. 8, б, временные осциллограммы излучения имеют несколько максимумов, что может быть объяснено включением различных газовых компонентов (молекул, атомов, ионов и электронов) в процесс возбуждения электронного состояния $B^3\Sigma_g^-$ молекулы кислорода с последующим излучательным переходом $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$.

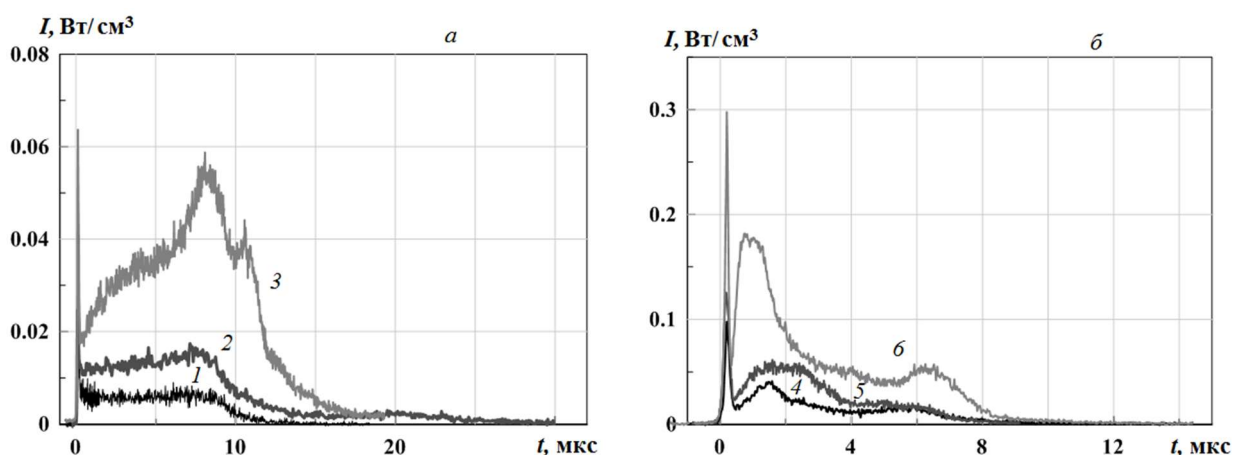


Рис. 8. Временные осциллограммы излучения линии $\lambda = 213$ нм молекулы кислорода при $p_0 = 1.0$ (а) и 0.25 (б) Торр: а – $V_{SW} = 6.10$ (1), 6.67 (2) и 7.50 (3) км/с; б – $V_{SW} = 8.06$ (4), 8.77 (5) и 10.00 (6) км/с [29]

Помимо исследования эмиссионных характеристик высокотемпературного молекулярного кислорода, на ударной трубе STS-M проведена серия экспериментов по измерению временных осциллограмм поглощения излучения в ударно нагретом молекулярном кислороде при начальном давлении в камере низкого давления $p_0 = 1$ Торр и скоростях падающей ударной волны V_{SW} в интервале от 3.4 до 4.5 км/с [39]. Поглощение света исследовалось в интервале длин волн $\lambda = 213 \div 260$ нм, который соответствует системе полос Шумана – Рунге. Измерялась эволюция во времени отношения I/I_0 , где I_0 и I – регистрируемые фотоумножителем сигналы, соответствующие интенсивности зондирующего излучения, до и после прохождения его через фронт ударной волны. На основе сравнения экспериментальных данных с результатами расчета по спектральной модели [40] проанализировано влияние связанны-связанных и связанны-несвязанных переходов в системе Шумана – Рунге на абсорбционные свойства кислорода.

На рис. 9 приведены временные осциллограммы поглощения излучения на длине волны $\lambda = 250$ нм в зависимости от скорости ударной волны. Начальный момент времени $t = 0$ соответствует прохождению фронта ударной волны через измерительную секцию трубы. За фронтом ударной волны происходит сильное увеличение поглощения излучения, являющееся результатом резкого роста колебательной температуры. Общая тенденция состоит в

уменьшении величины I/I_0 и, соответственно, в увеличении поглощения при росте V_{SW} от 3.5 до 4.0 км/с. Это связано с более интенсивным заселением возбужденных колебательных уровней при более высокой скорости ударной волны, когда поступательная температура за ударным фронтом также имеет более высокое значение. Дальнейший рост V_{SW} ведет к обратной зависимости величины I/I_0 , когда интенсивность поглощения зондирующего излучения уменьшается с ростом V_{SW} .

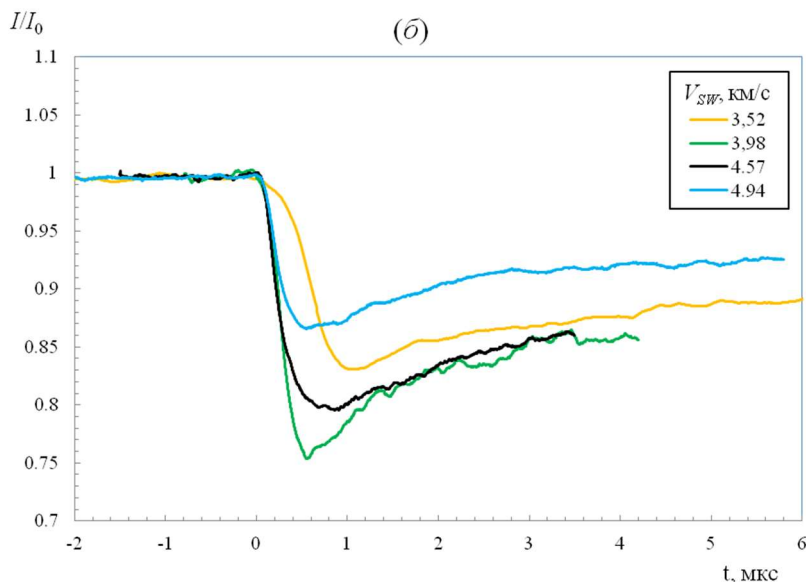


Рис. 9. Измеренные осциллограммы поглощения излучения в молекулярном кислороде на длине волны $\lambda = 250$ нм в зависимости от скорости ударной волны

Излучение высокотемпературного воздуха за фронтом сильной ударной волны измерялось в широком интервале длин волн от VUV до IR спектрального диапазона ($\lambda = 115 \div 1100$ нм). Исследование радиационных характеристик воздуха в VUV области ($\lambda = 115 \div 200$ нм) проводилось на ударной трубе STS-M, которая оснащена соответствующей вакуумной аппаратурой [41–44]. Спектральные данные получены при скоростях ударной волны до 10.7 км/с при начальном давлении газа в КНД p_0 , равном 0.125 Торр. Радиационные характеристики воздуха в UV, VIS и IR спектральных диапазонах ($\lambda = 190 \div 1100$ нм) получены в основном на ударной трубе DDST-M при скоростях ударной волны до 11.4 км/с при $p_0 = 0.25$ Торр [6, 18, 30–35]. Предварительная калибровка измерительных систем обеих ударных труб позволила представить полученные данные в абсолютных единицах.

Панорамный спектр ударно нагретого воздуха в VUV области, измеренных на ударной трубе STS-M при начальном давлении $p_0 = 0.125$ Торр и скорости ударной волны $V_{SW} = 10$ км/с [44], приведен на рис. 10. Видно, что значительную интенсивность на спектрограмме имеют линии атома азота на длинах волн $\lambda = 120.0, 141.2, 149.3$ и 174.5 нм, а также резонансная линия атома кислорода на длине волны $\lambda = 130.2$ нм и три линии атома углерода на длинах волн $\lambda = 156.1, 165.8$ и 195.1 нм. Фоновое излучение, которое включает в себя тормозное и фото-рекомбинационное излучение электронов низкотемпературной плазмы, в рассматриваемом случае не играет заметной роли. Наличие в спектре воздушной смеси линий атома углерода может быть объяснено присутствием в воздухе углерод содержащих примесей (CO_2 и углеводороды).

На рис. 11 приведены временные зависимости излучения спектральной линии атома азота на длине волны $\lambda = 149$ нм в воздухе при различных значениях скорости ударной волны V_{SW} и начальном давлении в камере низкого давления $p_0 = 0.125$ Торр [44].

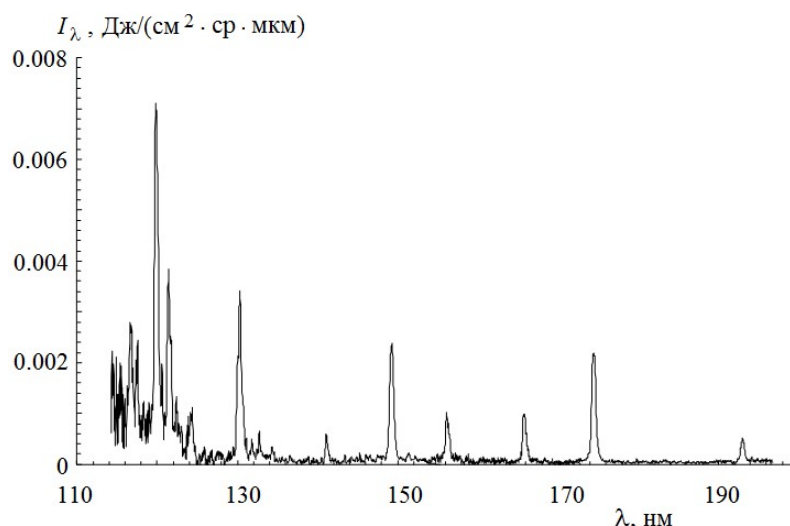


Рис. 10. Спектральная плотность излучения I_λ ударно нагретого воздуха в VUV диапазоне при $p_0 = 0.125$ Торр и $V_{SW} = 10.0$ км/с [44]

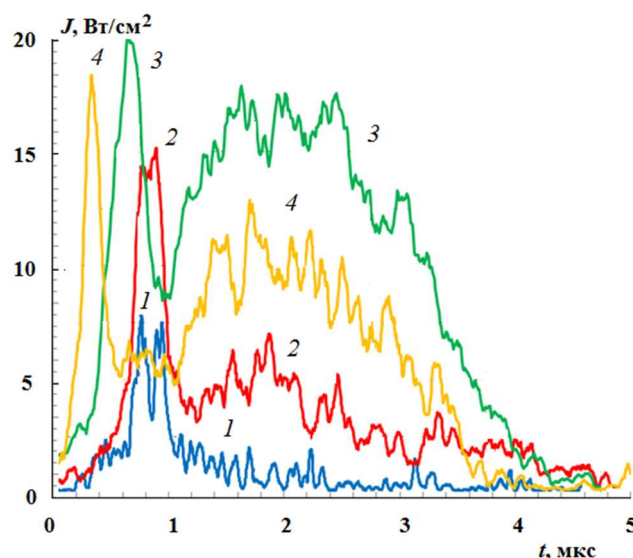


Рис. 11. Временная зависимость интенсивности излучения атомов азота на длине волн $\lambda = 149$ нм в ударно нагретом воздухе при $p_0 = 0.125$ Торр и значениях скорости ударной волны V_{SW} : 1 – 8.79 км/с, 2 – 9.95 км/с, 3 – 10.36 км/с, 4 – 10.72 км/с [44]

Линия представляет собой изолированный триплет атома азота, описывающий переход с уровня $2s^22p^2(^3P)3s\ ^2P$ на уровень $2s^22p^3\ ^2D^0$ и состоящий из трех полос на длинах волн $\lambda = 149.26$, 149.28 и 149.47 нм. Видно, что на начальном этапе процесса происходит сильный всплеск интенсивности излучения J с последующим выходом на равновесный уровень. При небольших скоростях ударной волны пиковая интенсивность J_{max} значительно превышает равновесные значения. Увеличение скорости ударной волны ведет к уменьшению этой разницы, и при $V_{SW} \geq 10$ км/с пиковая интенсивность практически совпадает с равновесными значениями.

Основной объем информации по радиационным характеристикам воздуха в UV, VIS и IR спектральных диапазонах был получен на ударной трубе DDST-M [6, 18, 30–35]. Типичный панорамный спектр, измеренный при начальном давлении в камере низкого давления $p_0 = 0.25$ Торр и скорости ударной волны $V_{SW} = 10$ км/с, приведен на рис. 12 [33–35]. Его анализ показывает, что в UV/VIS области ($\lambda = 190 \div 500$ нм) основной вклад в излучение

дают полосы молекул N_2 и NO , радикалов CN и молекулярных ионов N_2^+ . Наблюдается также ряд дополнительных полос, связанных с присутствием в исследуемом воздухе различных углеродсодержащих примесей и, в частности, углекислого газа. В первую очередь это относится к фиолетовой системе полос цианистого радикала CN ($\lambda = 330 \div 425$ нм) и атомарным линиям углерода ($\lambda = 193$ и 247 нм).

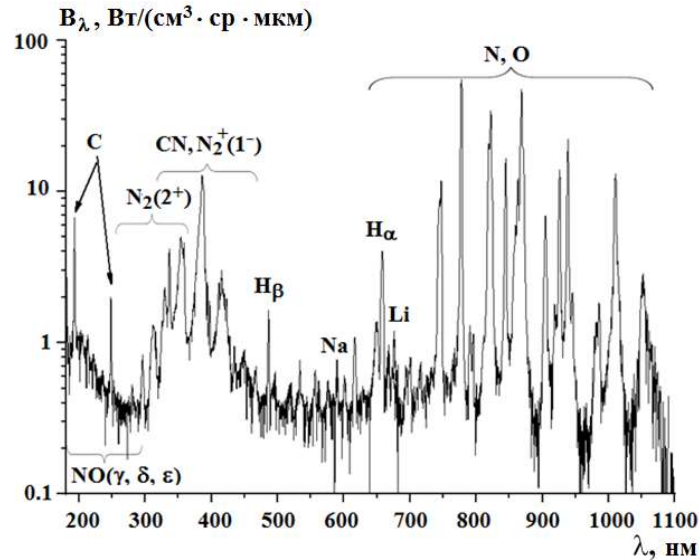


Рис. 12. Панорамный спектр излучения ударно нагретого воздуха в UV/VIS/IR спектральном диапазоне при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10$ км/с [33–35]

В VIS/IR спектральной области ($\lambda = 480 \div 1100$ нм) основной вклад в излучение дают атомарные линии, изображенные на рис. 12 узкими пиками. В первую очередь это относится к линиям атома азота ($\lambda = 601, 649, 664, 747, 939, 986$ и 1054 нм) и кислорода ($\lambda = 557, 604, 615, 777, 822, 845$ и 926 нм), образующимися за фронтом сильной ударной волны за счет диссоциации молекул воздуха. Наблюдаются линии излучения атома водорода (H_α и H_β), которые хорошо контролируют содержание в исследуемом воздухе паров воды. На спектрограмме присутствуют также линии атомов Na ($\lambda = 589$ нм) и Li ($\lambda = 671$ нм), которые обусловлены присутствием в воздухе соответствующих солей.

Поведение временных спектральных характеристик ударно нагретого воздуха зависит не только от длины волны излучения, но и от скорости распространения ударной волны. Это хорошо прослеживается по спектрограммам излучения молекулы NO , измеренным в работах [45, 46]. На рис. 13 показано изменение интенсивности излучения линии $\lambda = 213$ нм молекулы NO при различных значениях величины V_{SW} [45]. Анализ приведенных данных показывает, что при низких скоростях ударной волны излучение характеризуется четко выраженными неравновесной и равновесной зонами. При $V_{SW} = 10.9$ км/с величина интенсивности излучения в равновесной зоне начинает приближаться к пиковой интенсивности неравновесной зоны, и при $V_{SW} = 11.4$ км/с интенсивность неравновесного излучения становится меньше равновесного.

Большой объем информации по радиационным характеристикам ударно нагретого воздуха применительно к условиям входа космических аппаратов в атмосферу Земли с орбитальными и сверхорбитальными скоростями получен также на зарубежных ударных установках. К ним в первую очередь относится электроразрядная установка EAST, эксплуатируемая в Исследовательском центре NASA Ames (США) [47]. На рис. 14 проводится сравнение панорамных спектров ударно нагретого воздуха, полученных на установке EAST для скорости 10 км/с и начального давления 0.2 Торр [48] и на установке DDST-M для той же скорости и начального давления 0.25 Торр [33].

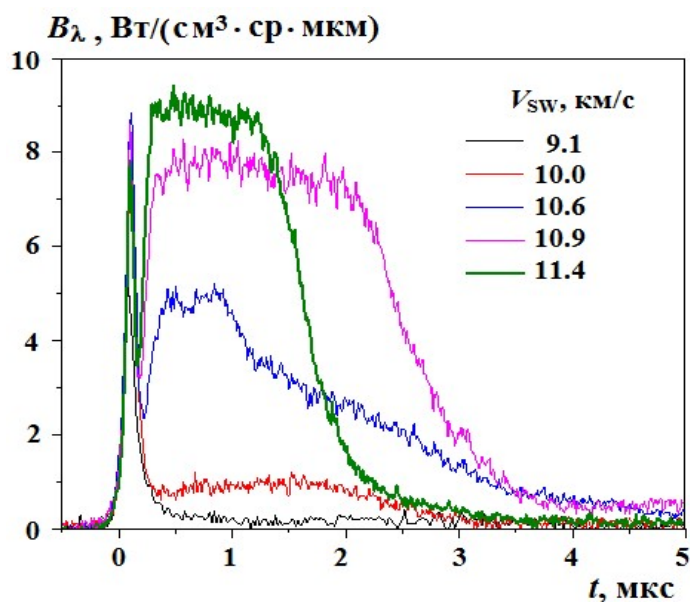


Рис. 13. Временная зависимость интенсивности излучения на длине волны $\lambda = 213$ нм молекулы NO в ударно нагретом воздухе при $p_0 = 0.25$ Торр и различных значениях скорости ударной волны V_{SW} при ширине спектрального интервала $\Delta\lambda = 4$ нм [45]

Анализ данных, приведенных на рис. 14 показывает, что все спектрограммы в общих чертах повторяют друг друга. Наибольшее различие наблюдается в области спектра $\lambda = 370 \div 420$ нм, где большую роль играет излучение радикала CN, концентрация которого сильно зависит от содержания в исследуемом воздухе CO_2 .

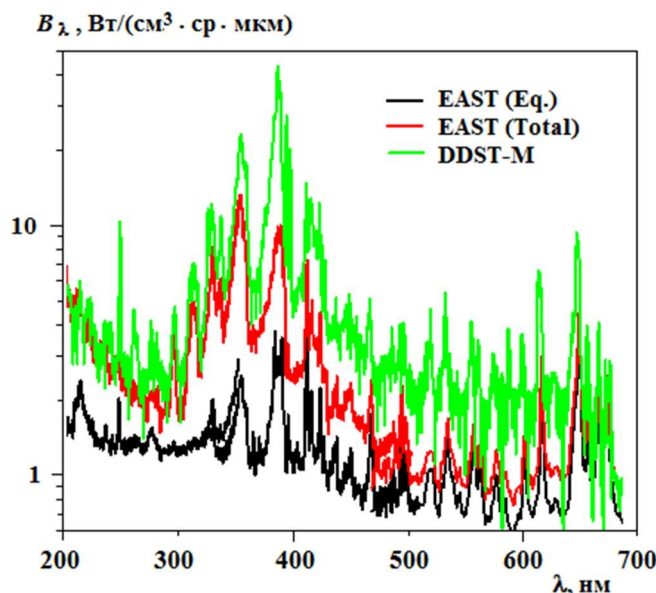


Рис. 14. Сравнение панорамных спектров излучения воздуха, полученных на ударной трубе DDST-M при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10.0$ км/с [33] и ударной установке EAST при $p_0 = 0.2$ Торр и $V_{SW} = 10.0$ км/с [46]. Данные EAST пересчитаны для равновесной (черная линия) и суммы равновесной и неравновесной областей излучения (красная линия)

Исследование излучения смеси CO_2 (70 %) и N_2 (30 %), моделирующей атмосферу Марса, проведено на ударной трубе DDST-M для двух комбинаций начальных давлений и

скоростей ударной волны: $V_{SW} = 5.3 \div 8.1$ км/с при давлении $p_0 = 0.3$ Торр и $V_{SW} = 5.4 \div 6.8$ км/с при давлении $p_0 = 1.0$ Торр, соответственно [36]. На рис. 15 приведен панорамный спектр излучения ударно нагретого газа при $p_0 = 0.3$ Торр и скоростях ударной волны порядка 7 км/с, что примерно соответствует второй космической скорости для Марса. Видно, что в спектральном диапазоне $\lambda = 200 \div 300$ нм интенсивность излучения слабо зависит от скорости ударной волны. С другой стороны, сильная зависимость интенсивности излучения от скорости ударной волны наблюдается в спектральном диапазоне $\lambda = 450 \div 850$ нм, основной вклад в излучение дает система полос Свана молекулы C_2 (C_2 Swan). Полученные экспериментальные данные стали основой для тестирования модели по численному исследованию излучения за фронтом сильной ударной волны в газовой смеси CO_2-N_2 [49]. Модель основана на методе прямого статистического моделирования Монте-Карло и учитывает физико-химические свойства атомов и молекул, поступательно-вращательный и поступательно-колебательный обмен энергией, кинетику химических реакций, возбуждение электронных уровней атомов и молекул, а также процессы переноса радиационной энергии.

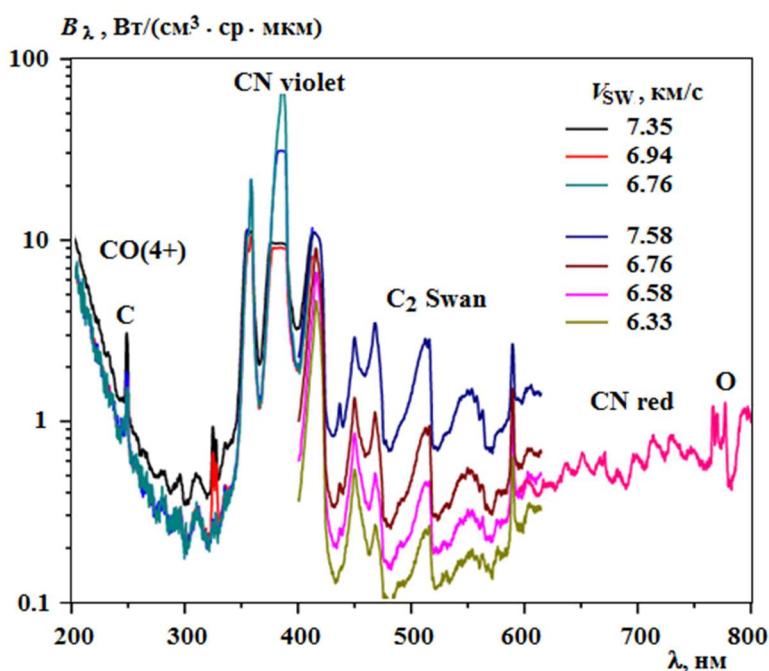


Рис. 15. Панорамный спектр излучения ударно нагретой смеси CO_2/N_2 при $p_0 = 0.3$ Торр и различных скоростях ударной волны [36]

4. Самовоспламенение горючих смесей в ударно нагретом газе

Исследование самовоспламенения горючих смесей в ударно нагретом газе было проведено на ударной установке STM применительно к различным смесям на основе водорода [50–52], пропана [11, 53–56] и пропилена [57]. Использование быстродействующих датчиков давления совместно с применением оптической системы OS и световода OF, настроенных на длину волны $\lambda = 310$ нм излучения возбужденного радикала OH^* , а также датчиков теплового потока [11, 56] позволило не только измерить время задержки воспламенения смеси за падающей и отраженной ударной волной, но и оценить пространственно-временные характеристики процесса воспламенения.

Серия экспериментов по измерению времени задержки низкотемпературного ($T \leq 1000$ К) воспламенения водородно-воздушной [50] и водородно-кислородной [51] смеси за падающей ударной волной проведена в интервале температур $T = 650 \div 920$ К и давлений $p = 0.13 \div 0.7$ МПа. Показано, что данная величина, как и в случае формирования локальных

очагов пламени при низкотемпературном воспламенении смесей за отраженной ударной волной, определяется временем распространения зоны горения из нагретого сверхзвуковым потоком пограничного слоя на весь объем трубы (так называемое время дефлаграционного распространения пламени τ_d) [58]. На рис. 16 значения времени задержки воспламенения τ за падающей ударной волной, измеренные в [50], сравниваются с соответствующими значениями, измеренными за отраженной ударной волной в работах других авторов, а также с вычисленными значениями величин τ_k и τ_d для стехиометрической водородно-воздушной смеси при $p = 0.2$ МПа. Расчет кинетического времени самовоспламенения смеси τ_k проведен с использованием кинетического механизма [59] в приближении адиабатического процесса при постоянном давлении.

Анализ рис. 16 показывает, что в высокотемпературной области ($T \geq 1000$ К) значения времени задержки воспламенения τ , измеренные за фронтом отраженной ударной волны различными авторами, хорошо описываются расчетной кривой $\tau_k = \tau_k(T)$, что говорит о кинетическом характере самовоспламенения в данной области. При температурах $T \leq 900$ К кинетическая кривая значительно превосходит экспериментальные точки. Механизм воспламенения меняется с кинетического на дефлаграционный, при котором время задержки воспламенения τ_d зависит как от кинетических, так и от гидродинамических особенностей горючей смеси.

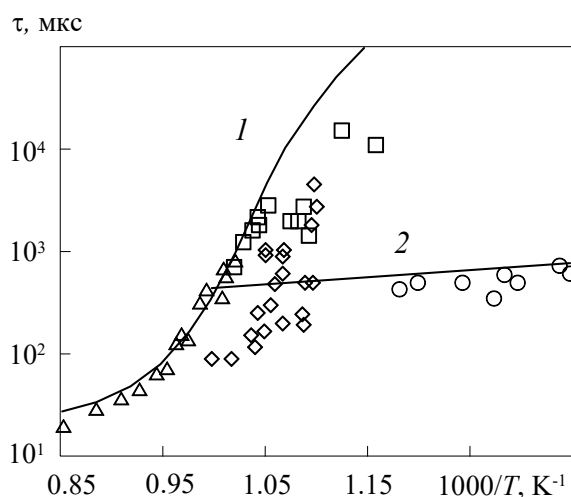


Рис. 16. Время задержки воспламенения стехиометрической водородно-воздушной смеси при $p = 0.2$ МПа: о – экспериментальные данные настоящей работы за падающей ударной волной; □, ∇ и Δ – экспериментальные за отраженной ударной волной; 1 – кинетическое время индукции τ_k , 2 – время дефлаграционного распространения пламени τ_d

Времена задержки воспламенения τ в водородно-кислородных смесях, сильно разбавленных аргонном, измерялись за фронтом падающей ударной волны при температурах газа $T = 870 \div 2500$ К и давлениях $p = 0.5 \div 1.5$ атм [52]. Степень разбавления смесей аргонном варьировалась от 89 до 97 %. Коэффициент эквивалентности ϕ изменялся от 0.1 (бедная смесь) до 2.0 (богатая смесь). Некоторые результаты измерений представлены на рис. 17. Экспериментальные данные были получены при давлениях за ударной волной порядка 1 атм. Линиями показаны результаты численного моделирования при соответствующих экспериментальных условиях. Анализ рис. 17 показывает, что значение τ при температурах $T \geq 1000$ К не сильно зависит от коэффициента эквивалентности ϕ . В частности, экспериментальные точки с $\text{Ar} = 95\%$ и $\phi = 2$ (синие квадраты) расположены в непосредственной близости от экспериментальных точек с $\phi = 0.1$ (зеленые квадраты). Другими словами, как богатые, так и бедные смеси имеют примерно одинаковые зависимости $\tau = \tau(T)$ при одинаковом содержании

аргона в смеси. Напротив, значение τ сильно увеличивается с ростом концентрации аргона. Это хорошо иллюстрируют экспериментальные точки, полученные при $\text{Ar} = 92\%$ (черные квадраты) и $\text{Ar} = 97\%$ (красные квадраты), которые по абсолютной величине различаются примерно на полпорядка. Численное моделирование процесса воспламенения с использованием кинетического механизма [60] достаточно хорошо воспроизводит поведение экспериментальных точек.

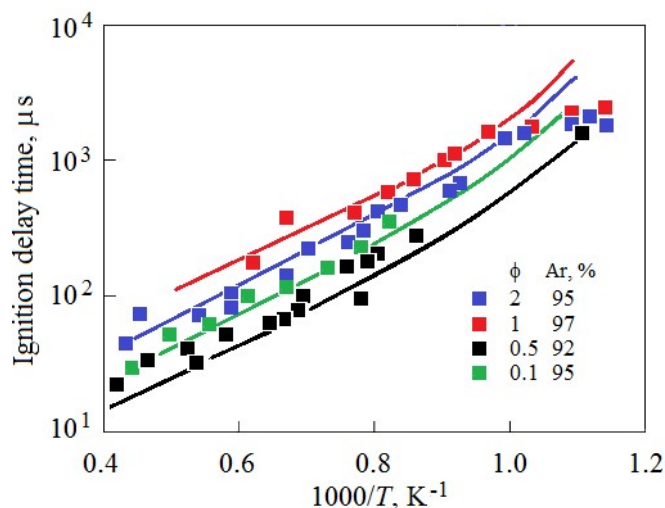


Рис. 17. Времена задержки воспламенения τ , измеренные при различных коэффициентах эквивалентности и степенях разбавления смесей аргоном [52]

Начальную стадию горения смеси H_2/O_2 , разбавленной аргоном, можно рассматривать как воспламенение только ее стехиометрической части. В этом случае избыточный водород в богатой горючей смеси или избыточный кислород в бедной горючей смеси будут одновременно с аргоном выступать в качестве нейтрального разбавителя. В связи с этим можно предположить, что время задержки воспламенения τ в высокотемпературной области линейно зависит от обратной величины парциального давления p_S стехиометрической части горючей смеси. Иными словами, должна иметь место зависимость: $\tau p_S = \tau p_S(T)$. Сравнение измеренных в работе [52] значений τp_S для смесей с одинаковыми значениями коэффициента эквивалентности ϕ , но с разной степенью разбавления аргоном и при разных давлениях подтверждает эту зависимость. Для определения парциального давления p_S необходимо выделить стехиометрическую часть смеси и умножить ее мольную долю на давление газа p за фронтом ударной волны. В частности, мольная доля стехиометрической части для смеси $4\% \text{H}_2 + 4\% \text{O}_2 + 92\% \text{Ar}$ равна 0.06. В этом случае значение p_S равно 0.12 атм при давлении газа $p = 2$ атм.

Использование величины τp_S для анализа полученных в работе [52] экспериментальных данных позволило выявить основные закономерности процесса воспламенения горючих смесей различного состава. Результаты измерения времени задержки воспламенения, показанные на рис. 17 и пересчитанные на величину τp_S , показаны на рис. 18. Видно, что экспериментальные точки, представленные в виде зависимости $\tau p_S = \tau p_S(T)$, сосредоточены вдоль двух аппроксимационных кривых. Первая группа точек соответствует богатым горючим смесям и смесям, близким к стехиометрическим, для которых температурная зависимость τp_S практически не зависит от состава смеси и удовлетворяет закону Аррениуса с энергией активации $E = 6960$ К. Отклонение значения τp_S от аппроксимационной кривой в интервале температур $T = 1000 \div 2500$ К составляет порядка $15 \div 20\%$, что находится в пределах разброса экспериментальных точек. Вторая группа точек соответствует обедненным топливом смесям, характеризующимся высоким содержанием кислорода. Значения τp_S для

этих смесей в $2 \div 5$ раз ниже аналогичных значений, измеренных в смесях с избытком топлива. При этом температурная зависимость τp_S также подчиняется закону Аррениуса с энергией активации $E = 5720$ К.

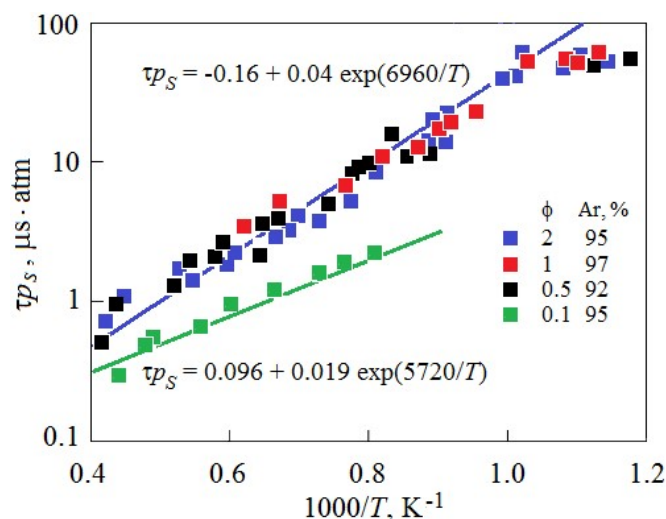


Рис. 18. Величины τp_S , пересчитанные из результатов измерений, приведенных на рис. 17. Линии – аппроксимирующие кривые

Серия экспериментов по измерению времени задержки высокотемпературного ($T \geq 1000$ К) самовоспламенения пропан-воздушных смесей [11, 53, 54] и пропан-кислородных смесей, сильно разбавленных аргоном, [55] за отраженной ударной волной проведена в интервале температур $T = 1043 \div 1778$ К, давлений $p = 17.7 \div 42.8$ атм и коэффициентов избытка топлива $\phi = 0.5, 1.0$ и 2.0 . Полученная информация расширяет диапазон имеющихся экспериментальных данных, являющихся основой для тестирования редуцированных кинетических механизмов, которые используются для моделирования процесса горения пропана в различных камерах сгорания.

Результаты измерений времени задержки воспламенения пропан-воздушной смеси в зависимости от обратной температуры смеси и коэффициента избытка топлива приведены на рис. 19 [53].

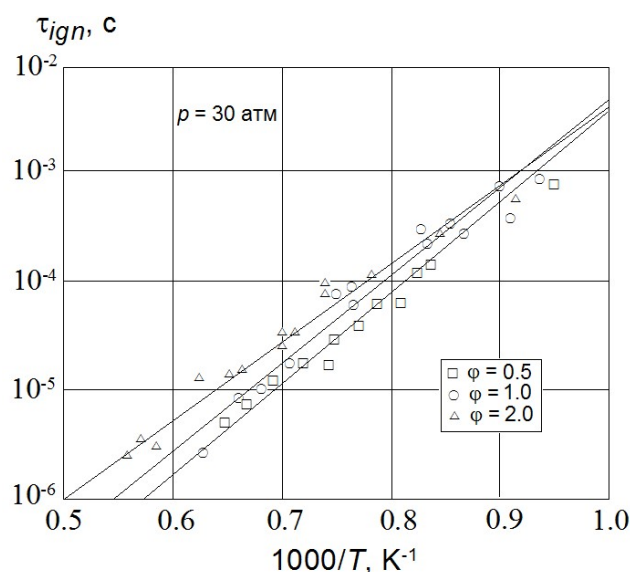


Рис. 19. Измеренные времена задержки воспламенения в пропан-воздушной смеси при давлении порядка 30 атм и различных коэффициентах избытка топлива [53]: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимирующие кривые

Анализ приведенных данных показывает, что при всех значениях коэффициента ϕ поведение измеренных значений величины τ_{ign} можно описать аррениусовой зависимостью, что выражается в прямолинейности аппроксимирующих кривых. При возрастании коэффициента ϕ время задержки воспламенения тоже увеличивается, что согласуется с результатами измерений других авторов в данной области температур. При этом наблюдается небольшое расхождение аппроксимирующих линий при повышении температуры. С другой стороны, продолжение этих линий в низкотемпературную область должно привести к их пересечению при температурах порядка 1000 К. Соответственно, зависимость величины τ_{ign} от коэффициента ϕ может стать незначительной или вообще смениться на противоположную.

На рис. 20 результаты измерения величины τ_{ign} , полученные в [53] при давлении $p = 30$ атм для стехиометрической пропан-воздушной смеси (коэффициент избытка топлива $\phi = 1.0$) сравниваются с экспериментальными данными других авторов, полученными при разных давлениях. Видно, что экспериментальные точки, показанные на рисунке, можно объединить в три группы. Данные Horning et al. [60] при $p = 1$ атм и данные Penyazkov et al. [61] при $p = 2 \div 3$ атм достаточно хорошо коррелируют друг с другом и лежат почти на порядок выше по сравнению с результатами настоящей работы. С другой стороны, данные Brown et al. [62] при $p = 3.4 \div 5$ атм, данные Penyazkov et al. [61] при $p = 6 \div 10$ атм и данные Burcat et al. [63] при $p = 8 \div 14$ атм лежат чуть выше экспериментальных точек настоящей работы, что вполне соответствует обратно пропорциональной зависимости τ_{ign} от давления. Данные Penyazkov et al. [61] при всех давлениях в области высоких температур лежат ниже аппроксимирующих кривых, что связано с тем, что измерения проводились не при постоянном давлении, а при постоянной плотности смеси.

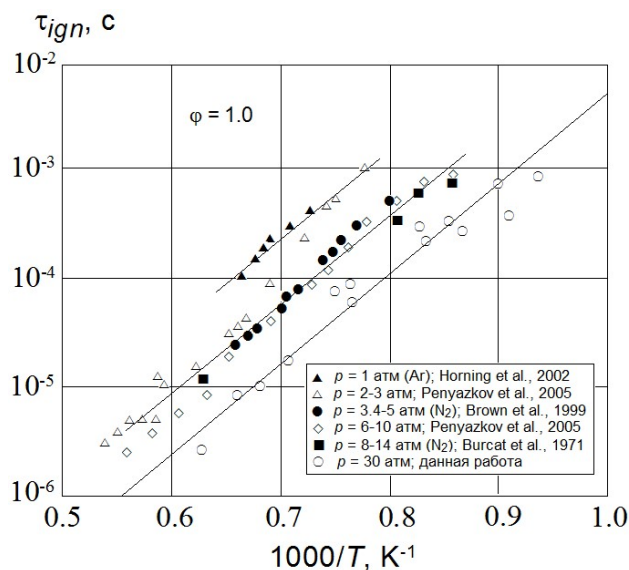


Рис. 20. Сравнение полученных в [53] экспериментальных данных для стехиометрических пропан-воздушных смесей ($\phi = 1.0$) с данными измерений других авторов при более низких давлениях: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимирующие кривые

Традиционными диагностическими средствами для определения времени задержки воспламенения τ_{ign} горючей смеси в ударных трубах являются давление и излучение возбужденных частиц, в частности, радикала OH^* . Однако на малых временах (порядка нескольких микросекунд) точное определение такой задержки может быть затруднено из-за недостаточно малой инерционности датчика давления и ограниченной входной апертуры оптической системы. Поэтому в работах [56, 64] проведена серия экспериментов на ударной трубе STM

с различными пропан-воздушными смесями для оценки возможности использования термоэлектрического детектора [22] для изучения воспламенения ударно нагретых углеводородных топлив. Для определения времен задержки воспламенения τ_{ign} использовались показания датчика давления TD, оптической системы OS и световода OF, настроенных на длину волны $\lambda = 310$ нм излучения возбужденного радикала OH^* за отраженной ударной волной, и термоэлектрического детектора TD (см. рис. 4).

На рис. 21 приведены зависимости от времени теплового потока, измеренного термоэлектрическим детектором TD, а также давления и эмиссии OH^* , зарегистрированных датчиком PD и оптическими системами OS и OF, соответственно [64]. Данные получены для бедной пропан-воздушной смеси ($\varphi = 0.5$) при температуре за отраженной ударной волной $T = 1644$ К и давлении $p = 21.2$ атм. Видно, что в рассматриваемых условиях термоэлектрический датчик TD хорошо фиксирует временную эволюцию теплового потока. Нарастание основного сигнала датчика TD после прихода и отражения ударной волны от торцевой стенки трубы составляет порядка 0.1 мкс в то время, как время отклика датчика давления PD равно примерно 1 мкс.

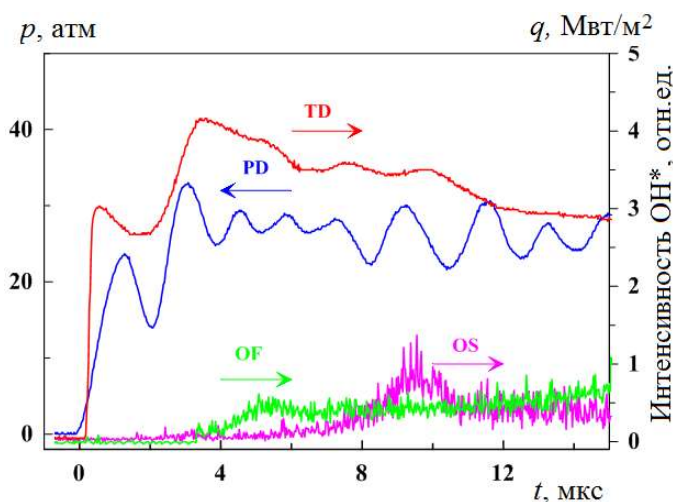


Рис. 21. Зависимости от времени давления (PD), теплового потока (TD) и интенсивности излучения радикалов OH^* (OS и OF), зарегистрированные измерительной системой ударно трубы STM (см. рис. 4) при воспламенении бедной пропан-воздушной смеси: $\varphi = 0.5$, $T = 1644$ К и $p = 21.2$ атм [64]

Другими словами, в масштабе долей микросекунды термоэлектрический датчик способен регистрировать резкие изменения температурного градиента, что свидетельствует о его малой инерционности. С учетом инерционности датчиков характер давления и теплового потока на рис. 21 достаточно хорошо совпадают. Следует отметить, что при таких коротких временных масштабах для регистрации доступны большие значения теплового потока q ($q \geq 4$ МВт/м²). При этом отношение сигнал/шум находится на достаточно высоком уровне, что позволяет распознавать все особенности, возникающие при воспламенении смеси и дальнейшем протекании процесса горения.

5. Концентрация электронов до и после ударной волны

С помощью ударной установки DDST-M была проведена серия зондовых измерений параметров низкотемпературной плазмы перед фронтом падающей ударной волны [65, 66]. Для этого в конструкцию ударной трубы был добавлен изолированный электрический зонд Z для контактной регистрации параметров плазмы, который имел одноэлектродную конструкцию и находился на расстоянии 3100 мм вниз по потоку от диафрагмы D2, разделяющей

КПД и КНД. Полученные с помощью зонда Z результаты позволили описать процессы фотоэффекта и фото-ионизации частиц исследуемого газа перед ударной волной за счет жесткого излучения ударно нагретой среды и оценить влияние этих процессов на изменение потенциала зонда.

Зависимость показаний зонда Z от процессов, протекающих вблизи его поверхности, демонстрируется на рис. 22 [65]. В первую очередь это – фотоэффект от излучения толкающего газа (гелия), который возникает сразу после открытия диафрагмы D2. Далее, после формирования вторичной ударной волны начинает сказываться фотоэффект от излучения ударно нагретого газа. И, наконец, перед самым приходом вторичной ударной волны к зонду ($t = 0$) он начинает фиксировать фотоионизацию газа перед фронтом ударной волны за счет излучения ударно нагретого газа. В данном эксперименте вторичная ударная волна движется по камере низкого давления, заполненной чистым азотом, со скоростью $V_{SW} = 10.0$ км/с при начальном давлении перед фронтом УВ $p_0 = 0.25$ Торр. Скорость первичной ударной волны, которая распространялась по КПД, заполненной гелием, и затем отразилась от диафрагмы D2, составляет 6.25 км/с.

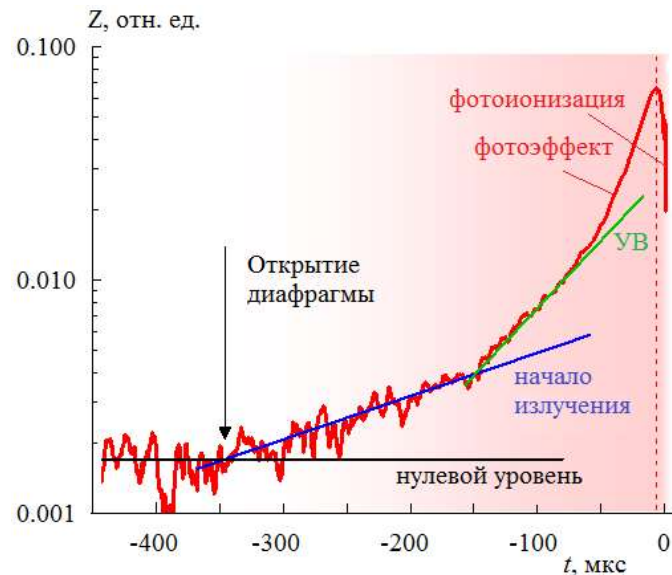


Рис. 22. Сигнал с зонда Z, показывающий явления фотоэффекта и фотоионизации при подходе к нему сформировавшейся вторичной ударной волны в азоте [65]

В работе [67] зондовый метод применен для измерения концентрации электронов перед ударной волной. Концентрация электронов является основной характеристикой низкотемпературной плазмы перед ударной волной. Электроны-предшественники, образующиеся в невозмущенном газе, могут существенно влиять на радиационные процессы за ударной волной [68]. Это необходимо учитывать при построении соответствующих радиационно-столкновительных моделей, описывающих неравновесные процессы в ударно нагретом газе [12]. Результаты измерения концентрации электронов n_e перед ударной волной при $V_{SW} = 10.4$ км/с и $p_0 = 0.25$ Торр в зависимости от расстояния до ударной волны представлены на рис. 23. Данные получены на основе обработки измеренных значений потенциала зонда Z. Видно, что концентрация электронов резко увеличивается с уменьшением расстояния от ударной волны до зонда. Это хорошо согласуется с данными СВЧ измерений, полученных в работе [69] примерно при тех же условиях.

В области за фронтом сильной ударной волны, где теория зонда Ленгмюра не работает, одним из основных методов измерения больших концентраций электронов является спектроскопический метод. В основе метода лежит анализ уширения атомарных линий вследствие

эффекта Штарка. Особый интерес при этом представляет линия атома водорода H_β серии Бальмера. В молекулярных газах с небольшой примесью паров воды или молекулярного водорода эта линия имеет ярко выраженный максимум на интегральной спектрограмме излучения и не затенена молекулярными полосами [18].

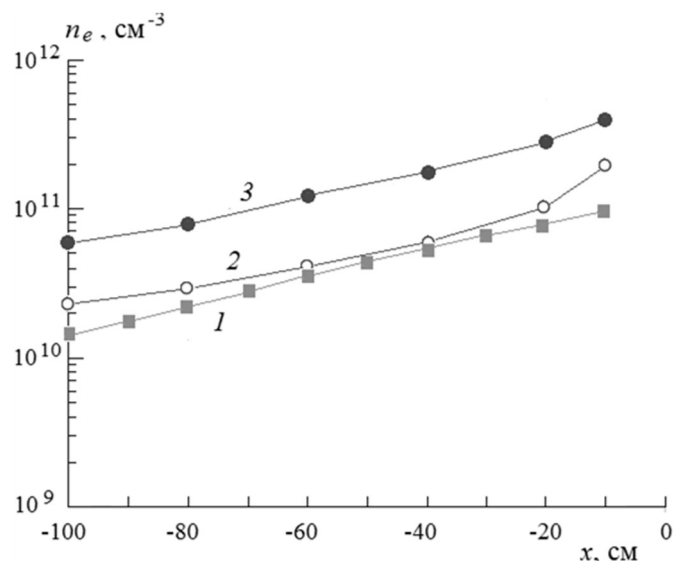


Рис. 23. Измеренные концентрации n_e перед ударной волной, распространяющейся по воздуху при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10.4$ км/с [67] (1) и их сравнение с данными СВЧ измерений [69] при $p_0 = 0.2$ Торр и $V_{SW} = 9.8$ (2) и 10.8 км/с (3)

На рис. 24 приведены результаты измерения интегральной плотности излучения I_{ICDD} и равновесной концентрации электронов n_e в кислороде, воздухе и азоте [70]. Спектрограммы излучения, показанные на рис. 24, *a*, измерены при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10.0$ км/с. Видно, что как по максимуму, так и по ширине линии H_β данные, полученные в кислороде, превышают соответствующие данные для азота. Это связано в первую очередь с тем, что потенциал ионизации атома кислорода, равный 13.62 эВ, значительно ниже потенциала ионизации атома азота (14.53 эВ). Поэтому степень ионизации ударно нагретого кислорода при одинаковых условиях значительно превышает соответствующую величину для азота.

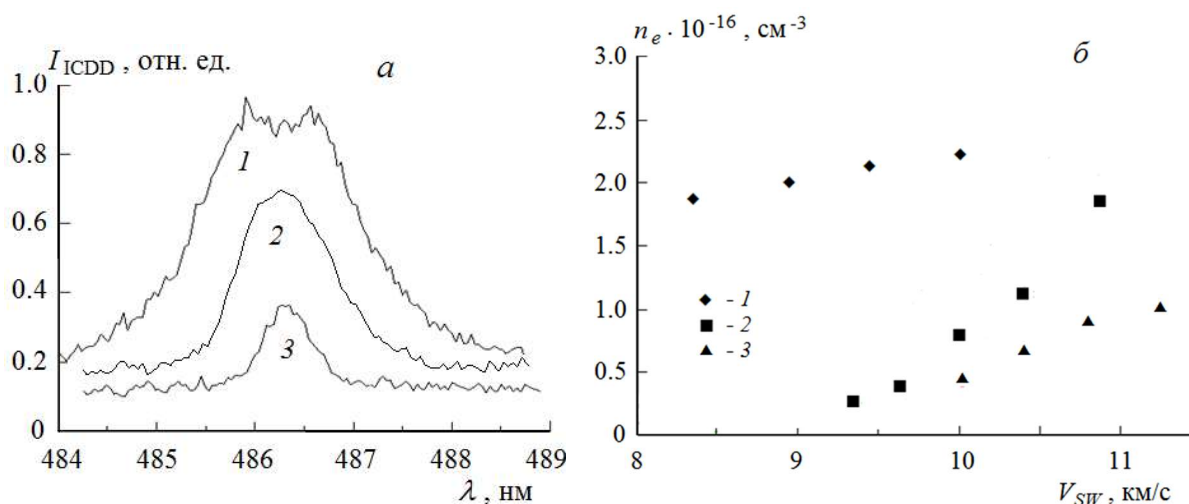


Рис. 24. Интегральная плотность излучения при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10.0$ км/с (*a*) и зависимость концентрации электронов от скорости ударной волны при $p_0 = 0.25$ Торр (*b*) в различных газах: 1 – кислород; 2 – воздух; 3 – азот [70]

Измененная равновесная концентрация электронов в кислороде, воздухе и азоте за сильной ударной волной при $p_0 = 0.25$ Торр в зависимости от V_{SW} показана на рис. 24, б. Видно, что увеличение скорости ударной волны V_{SW} от 8 до 10 км/с в ударно нагретом кислороде ведет к незначительному увеличению концентрации электронов, которая равна примерно 2×10^{16} см⁻³. Концентрация n_e в воздухе при $V_{SW} \approx 9.5$ км/с примерно в 5 раз ниже, что соответствует степени разбавления кислорода азотом в воздушной среде. В азоте ионизационный эффект начинает проявляться при $V_{SW} \geq 9.5$ км/с, что ведет к соответствующему увеличению концентрации n_e в воздухе. Следует отметить, что данные по измерению равновесной концентрации электронов за фронтом сильной ударной волны в кислороде и азоте получены в [70] впервые.

6. Заключение

На ударных установках экспериментального комплекса ЭКУД Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова за последние десять лет получен большой объем экспериментальной информации по излучению ударно нагретого газа, который позволяет выделить основные закономерности этого процесса на различных участках траектории движения спускаемого космического аппарата в атмосфере Земли и других планет Солнечной системы. С другой стороны, полученные данные представляют особую ценность для тестирования моделей физической и химической кинетики возбуждения и дезактивации электронно-возбужденных состояний атомов и молекул, ответственных за излучение газа на определенных длинах волн.

Серия экспериментов по измерению времени задержки низкотемпературного ($T \leq 1000$ К) воспламенения водородно-воздушной и водородно-кислородной смеси за падающей ударной волной, проведенная в интервале температур $T = 650 \div 920$ К и давлений $p = 0.13 \div 0.7$ МПа, показала, что данная величина определяется временем распространения зоны горения из нагретого сверхзвуковым потоком пограничного слоя на весь объем ударной трубы. Использование быстродействующих датчиков давления совместно с применением оптической системы, а также датчиков теплового потока позволило не только измерить время задержки воспламенения смесей на основе пропана и пропилена за падающей и отраженной ударной волной, но и оценить пространственно-временные характеристики процесса воспламенения.

Результаты проведенных зондовых измерений концентрации электронов перед ударной волной показали, что эта величина сильно зависит от скорости ударной волны и резко увеличивается с уменьшением расстояния от ударной волны до зонда, что хорошо согласуется с данными СВЧ и зондовых измерений, полученных в других работах примерно при тех же условиях. Концентрация электронов за ударной волной, измеренная спектроскопическим методом, также увеличивается с ростом скорости ударной волны и наибольшие значения имеет для кислорода, что объясняется малой величиной потенциала ионизации молекулы O₂. Полученные экспериментальные данные по измерению концентрации электронов в ударно нагретом кислороде и азоте являются оригинальными.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Экспериментальное и теоретическое исследование кинетических процессов в газах» (номер гос. регистрации АААА-А19-119012990112-4).

Литература

1. Reyner P. Survey of high-enthalpy shock facilities in the perspective of radiation and chemical kinetics investigations // *Prog. Aerospace Sci.* 2016. Vol. 85. Pp. 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.002>
2. Gu S., Oliver H. Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities // *Prog. Aerospace Sci.* 2020. Vol. 113. No. 100607. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100607>
3. Brandis A.M., Cruden B.A. Benchmark Shock Tube Experiments of Radiative Heating Relevant to Earth Re-entry. AIAA Paper 2017-1145. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1145>
4. McGilvray M., Doherty L.J., Morgan R.G., Gildfind D.E. T 6: The Oxford University Stalker tunnel. AIAA Paper 2015-3545. <https://doi.org/10.2514/6.2015-3545>
5. Lino da Silva M., Perreira R., Vargas J., Rodrigues R., Carvalho B., Alves L.L., Gonçalves B., Smith A., Merrifield J., McDowell S., Evans D., Reynier P., Villace V. F., Marraffa L. European shock-tube for high enthalpy research: Design and instrumentation, manufacturing, and acceptance testing. AIAA Paper 2020-0624. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0624>
6. Kozlov P.V., Bykova N.G., Gerasimov G. Ya., Levashov V.Yu., Kotov M.A., Zabelinsky I.E., Radiation properties of air behind strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2024. Vol. 214. Pp. 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.10.033>
7. Hanson R.K., Davidson D.F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2014. Vol. 44. Pp. 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.05.001>
8. Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Yu., Shatalov O.P., Tunik Yu.V., Zabelinskii I.E. Investigation of oxygen dissociation and vibrational relaxation at temperatures 4000–10800 K // *J. Chem. Phys.* 2013. Vol. 139. No. 034317. <https://doi.org/10.1063/1.4813070>
9. Han H.S., Kim C.J., Cho C.H., Sohn C.H., Han J. Ignition delay time and sooting propensity of a kerosene aviation jet fuel and its derivative blended with a bio-jet fuel // *Fuel.* 2018. Vol. 232. Pp. 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.032>
10. Shao J., Choundhary R., Peng Y., Davidson D.F., Hanson R.K. A shock tube study of n-heptane, iso-octane, n-dodecane, and iso-octane/n-dodecane blends oxidation at elevated pressures and intermediate temperatures // *Fuel.* 2019. Vol. 243. Pp. 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.152>
11. Tereza A.M., Kozlov P.V., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., Zabelinsky I.E., Bykova N.G. Shock-tube study of high-temperature ignition of propane-air mixtures at elevated pressures // *Acta Astronaut.* 2023. Vol. 204. Pp. 705–710. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
12. Суржигов С.Т. Применение квазистационарных eRC-моделей для расчета неравновесного излучения ударных волн при скорости порядка 10 км/с // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2022. Т. 23, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1015/>
13. Mohamed A.A.E.-S., Panigrahy S., Sahu A.B., Bourque G., Curran H.J. An experimental and kinetic modeling study of the auto-ignition of natural gas blends containing C1-C7 alkanes // *Proc. Combust. Inst.* 2021. Vol. 38. Pp. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.015>
14. Акимов Ю.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Левашов В.Ю. Экспериментальный комплекс «Ударная труба». <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
15. Brandis A.M., Johnston C.O., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D. Uncertainty Analysis and Validation of Radiation Measurements for Earth Reentry // *J. Thermophys. Heat Trans.* 2015. Vol. 29. Pp. 209–221. <https://doi.org/10.2514/1.T4000>
16. Brandis A.M., Johnson C.O., Cruden B.A. Non-equilibrium Radiation for Earth Entry. AIAA Paper 2016-3690. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3690>
17. Palumbo G., Craig R.A., Whiting E.W., Park C. Measured specific intensity from 130 to 900 nm at the stagnation point of a model in an arcjet flow of 7.8 km/sec // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1997. Vol. 51. Pp. 207–236. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(96\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(96)00138-0)

18. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., and Tunik V.Yu. Experimental study of air radiation behind a strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2022. Vol. 194. Pp. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.032>
19. Залогин Г.Н., Козлов П.В., Кузнецова Л.А., Лосев С.А., Макаров В.Н., Романенко Ю.В., Суржиков С.Т. Излучение смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-Ar}$ в ударных волнах: эксперимент и теория // *ЖТФ.* 2001. Т. 71, № 6. С. 10–16.
20. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Акимов Ю.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я., Тереза А.М. Развитие методики регистрации интенсивности излучения газов за фронтом сильных ударных волн // *Хим. физика.* 2021. Т. 40, № 8. С. 26–33.
21. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Акимов Ю.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я., Тереза А.М. Методика регистрации интенсивности излучения газов за фронтом сильных ударных волн в области вакуумного ультрафиолета // *Хим. физика.* 2022. Т. 41, № 9. С. 26–32.
22. Kotov M.A., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., et al. Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity // *Appl. Therm. Eng.* 2021. Vol. 195. No. 117143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117143>
23. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Y., Levashov V.Y., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Y., Glebov V.N., Dubrova G.A., Maluyutin A.M. Heat Flux Measurement in Shock Heated Combustible Gases and Clarification of Ignition Delay Time // *Fluids.* 2022. Vol. 7. No. 291. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.3390/fluids7090291>
24. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Ибрагимова Л.Б., Шаталов О.П. Исследование радиационных характеристик аргона за фронтом сильной ударной волны // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2015. Т. 16, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/577/>
25. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Шаталов О.П. Возбуждение и излучение аргона за фронтом ударных волн при со скоростях 4.5–7.8 км/с. I. Экспериментальное исследование // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2017. Т. 18, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/686/>
26. Kozlov P.V., Levashov V.Yu, Zabelinsky I.E., Bikova N.G. Argon radiation behind of shock wave front // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. No. 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022026>
27. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я. Экспериментальное исследование излучения аргона за фронтом сильной ударной волны // *Журн. Прикл. Спектр.* 2021. Т. 88. № 2. С. 244–248.
28. Kozlov P.V., Bykova N.G., Levashov V.Yu, Zabelinskii I.E. Nonequilibrium radiation behind shock waves in oxygen at speeds up to 10 km/s // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1250. No. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1250/1/012017>
29. Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я. Излучательные характеристики ударно-нагретого кислорода // *Журн. Прикл. Спектр.* 2022. Т. 89. № 1. С. 64–68.
30. Козлов П. В. Экспериментальное исследование радиационных свойств воздуха за фронтом ударной волны при скоростях до 10 км/с // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2016. Т.17, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-1/articles/624/>
31. Забелинский И.Е., Козлов П.В., Акимов Ю.В., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Туник Ю.В., Левашов В.Ю. Детонационное инициирование сильных ударных волн для исследования радиационных характеристик высокотемпературных газов // *Хим. физика.* 2021. Т. 40. № 11. С. 22–28.
32. Герасимов Г.Я., Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Левашов В.Ю. Исследование радиационных характеристик высокотемпературных газов, проведенное в ударных трубах // *Хим. физика.* 2022. Т. 41, № 8. С. 17–30.

33. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Экспериментальное исследование излучательных характеристик ударно нагретого воздуха в ультрафиолетовой и видимой областях спектра // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 6. С. 85–93.
34. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Излучательные характеристики ударно нагретого воздуха в видимой и инфракрасной областях спектра // Изв. РАН. МЖГ. 2023. № 5. С. 138–146.
35. Козлов П.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г. Исследование радиационных характеристик ударно нагретых газов // ИФЖ. 2023. Т. 96. № 7. С. 1861–1872.
36. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Экспериментальное исследование радиационных характеристик смеси CO₂-N₂ за фронтом сильной ударной волны // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 23–28.
37. Chai K.-V. and Kwon D.-H. Optical emission spectroscopy and collisional-radiative modeling for low temperature Ar plasmas // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. Vol. 227. No 1. Pp. 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.015>
38. Левашов В.Ю., Козлов П.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е. Особенности излучения аргоновой плазмы на начальном этапе за фронтом ударной волны // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 16–23.
39. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Кусов А.Л., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Козлов П.В. Экспериментальное и теоретическое исследование абсорбционных свойств ударно нагретого кислорода // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-3/articles/1105/>
40. Bykova N.G., Kusov A.L., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Zabelinsky I.E. Spectral Model for Calculation of Radiation Characteristics of a Shock-Heated Gas // Russ. J. Phys. Chem. B. 2024. Vol. 18. No. 3. Pp. 732–739. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700222>
41. Быкова Н.Г., Герасимов И.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Шаталов О.П. Исследование ударно-нагретого воздуха в спектральной области 120÷900 нм: панорамный спектр и эволюция излучения за фронтом ударной волны // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/114/>
42. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Козлов П.В., Стовбун С.В., Тереза А.М., Шаталов О.П. Радиационные характеристики воздуха в ультрафиолетовой и вакуумной ультрафиолетовой областях спектра за фронтом сильных ударных волн // Хим. физика. 2018. Т. 37, № 2. С. 35–41.
43. Stovbun S.V., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Tereza A.M., Shatalov O.P., Vlasov P.A. Evaluation of the Radiance of Shock-Heated Air in the 120–400-nm Spectral Range // Proc. 31st Int. Symp. Shock Waves. 2019. Springer. Vol. 1. Pp. 361–368. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8_41
44. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Излучение ударно-нагретого воздуха в вакуумно-ультрафиолетовой области спектра // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 10. С. 34–41.
45. Kozlov P.V. Experimental study of the evolution of NO radiation in the air at the velocities up to second cosmic // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 1009. No. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1009/1/012024>
46. Kozlov P.V., Surzhikov S.T. Nonequilibrium Radiation NO in Shocked Air. AIAA Paper 2017–0157. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0157>
47. Brandis A.M., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D., McGilvray M., Morgan R.G. Analysis of air radiation measurements obtained in the EAST and X2 shock tube facilities. AIAA Paper 2010-4510. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4510>
48. <https://data.nasa.gov/docs/datasets/aerothermodynamics/EAST/index.html>

49. Кусов А.Л., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Левашов В.Ю. Численное исследование излучения в ударно-нагретой смеси CO₂ и N₂ методом прямого статистического моделирования // Изв. РАН. МЖГ. 2023. № 6. С. 192–204.
50. Павлов В.А., Герасимов Г.Я. Измерение пределов воспламенения и времен индукции водородно-воздушных смесей за фронтом падающей ударной волны // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 6. С. 1238–1244.
51. Павлов В.А., Герасимов Г.Я. Воспламенение водородно-кислородных смесей за фронтом падающей ударной волны // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 3. С. 575–579.
52. Pavlov V., Gerasimov G., Levashov V., Kozlov P., Zabelinsky I., Bykova N. Shock Tube Study of Ignition Delay Times for Hydrogen–Oxygen Mixtures // Fire. 2023. Vol. 6, issue 11. <https://doi.org/10.3390/fire6110435>
53. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Воспламенение пропан-воздушных смесей в ударной трубе при давлении 30 атм // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-3/articles/942/>
54. Козлов П.В., Акимов Ю.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Воспламенение пропано-воздушной смеси за отраженной ударной волной при высоких давлениях // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 231–235.
55. Козлов П.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Акимов Ю.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г. Высокотемпературное воспламенение смесей пропан-кислород-аргон в ударной трубе при давлении 30 атм // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 35–40.
56. Котов М.А., Козлов П.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Шемякин А.Н., Соловьев Н.Г., Якимов М.Ю., Глебов В.Н., Дуброва Г.А., Малютин А.М. Регистрация воспламенения горючей смеси в ударной трубе с помощью термоэлектрического детектора // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 31–37.
57. Kozlov P.V., Kotov M.A., Gerasimov G.Ya, Levashov V.Yu, Bykova N.G., Zabelinskii I.E. Experimental Study of the Ignition of a Stoichiometric Propylene–Oxygen–Argon Mixture Behind a Reflected Shock Wave // Russ. J. Phys. Chem. B. 2024. Vol. 18. No. 4. Pp. 1019–1024. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700568>
58. Medvedev S.P., Agafonov G.L., Khomik S.V., Gelfand B.E. Ignition delay in hydrogen-air and syngas-air mixtures: Experimental data interpretation via flame propagation // Combust. Flame. 2010. Vol. 157. Pp. 1436–1438. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.03.003>
59. Герасимов Г.Я., Шаталов О.П. Кинетический механизм горения водородно-кислородных смесей // ИФЖ. 2013. Т. 86. № 5. С. 929–936.
60. Horning D.C., Davidson D.F., Hanson R.K. Study of the High-Temperature Autoignition of *n*-Alkane/O₂/Ar Mixtures // J. Propul. Power. 2002. Vol. 18. Pp. 363–371. <https://doi.org/10.2514/2.5942>
61. Penyazkov O.G., Ragotner K.A., Dean A.J., Varatharajan B. Autoignition of propane–air mixtures behind reflected shock waves // Proc. Combust. Inst. 2005. Vol. 30. Pp. 1941–1947. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.122>
62. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures // Combust. Flame. 1999. Vol. 117. Pp. 861–870. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(98\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(98)00133-3)
63. Burcat A., Lifshitz A., Scheller K., Skinner G.B. Shock-tube investigation of ignition in propane-oxygen-argon mixtures // Symp. (Int.) Combust. 1971. Vol. 13. P. 745. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80077-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80077-2)
64. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya, Levashov V.Yu, Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Yu, Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M. Thermoelectric detector application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture // Acta Astronaut. 2023. Vol. 204. Pp. 787–793. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.036>

65. Котов М.А., Козлов П.В., Осипенко К.Ю., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е. Исследование ионизационных процессов перед сильной ударной волной // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 10. С. 42–49.
66. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Osipenko K.Yu., Bykova N.G., Zabelinsky I.E. Precursor electrons formation before strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2024. Vol. 217. Pp. 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.035>
67. Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Kotov M.A. Measurement of the Electron Concentration in the Vicinity of a Strong Shock Wave // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2024. Vol. 18. No. 3. Pp. 725–731. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700210>
68. Katsurayama H., Matsuda A., Abe T. Preliminary Investigation of Thermochemical Nonequilibrium behind a Strong Shock Wave with Precursor Photoionization in Argon. AIAA Paper 2007-4552. <https://doi.org/10.2514/6.2007-4552>
69. Omura M., Presley L.L. Electron Density Measurements ahead of Shock Waves in Air // *AIAA J.* 1969. Vol. 7. Pp. 2363–2365. <https://doi.org/10.2514/3.5554>
70. Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Спектроскопическое измерение концентрации электронов в ударно нагретом газе // *ЖПС.* 2024. Т. 91. № 4. С. 540–545.

References

1. Reyner P., Survey of high-enthalpy shock facilities in the perspective of radiation and chemical kinetics investigations, *Prog. Aerospace Sci.*, 2016, vol. 85. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.002>
2. Gu S., Oliver H., Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities, *Prog. Aerospace Sci.*, 2020, vol. 113, no. 100607. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100607>
3. Brandis A.M., Cruden B.A., Benchmark Shock Tube Experiments of Radiative Heating Relevant to Earth Re-entry. AIAA Paper 2017-1145. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1145>
4. McGilvray M., Doherty L.J., Morgan R.G., Gildfind D.E., T 6: The Oxford University Stalker tunnel. AIAA Paper 2015-3545. <https://doi.org/10.2514/6.2015-3545>
5. Lino da Silva M., Perreira R., Vargas J., Rodrigues R., Carvalho B., Alves L.L., Gonçalves B., Smith A., Merrifield J., McDowell S., Evans D., Reynier P., Villace V. F., Marraffa L., European shock-tube for high enthalpy research: Design and instrumentation, manufacturing, and acceptance testing. AIAA Paper 2020-0624. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0624>
6. Kozlov P.V., Bykova N.G., Gerasimov G. Ya., Levashov V.Yu., Kotov M.A., Zabelinsky I.E., Radiation properties of air behind strong shock wave, *Acta Astronaut.*, 2024, vol. 214, pp. 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.10.033>
7. Hanson R.K., Davidson D.F., Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2014, vol. 44, pp. 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.05.001>
8. Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Yu., Shatalov O.P., Tunik Yu.V., Zabelinskii I.E., Investigation of oxygen dissociation and vibrational relaxation at temperatures 4000–10800 K, *J. Chem. Phys.*, 2013, vol. 139, no. 034317. <https://doi.org/10.1063/1.4813070>
9. Han H.S., Kim C.J., Cho C.H., Sohn C.H., Han J., Ignition delay time and sooting propensity of a kerosene aviation jet fuel and its derivative blended with a bio-jet fuel, *Fuel*, 2018, vol. 232, pp. 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.032>
10. Shao J., Choundhary R., Peng Y., Davidson D.F., Hanson R.K., A shock tube study of n-heptane, iso-octane, n-dodecane, and iso-octane/n-dodecane blends oxidation at elevated pressures and intermediate temperatures, *Fuel*, 2019, vol. 243, pp. 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.152>

11. Tereza A.M., Kozlov P.V., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Shock-tube study of high-temperature ignition of propane-air mixtures at elevated pressures, *Acta Astronaut.*, 2023, vol. 204, pp. 705–710. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
12. Surzhikov S.T., Application of quasi-stationary eRC models for calculating nonequilibrium radiation of shock waves at a speed of about 10 km/s, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1015/>
13. Mohamed A.A.E.-S., Panigrahy S., Sahu A.B., Bourque G., Curran H.J., An experimental and kinetic modeling study of the auto-ignition of natural gas blends containing C1-C7 alkanes, *Proc. Combust. Inst.*, 2021, vol. 38, pp. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.015>
14. Akimov Yu.V., Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Experimental complex "Shock tube". <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
15. Brandis A.M., Johnston C.O., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D., Uncertainty Analysis and Validation of Radiation Measurements for Earth Reentry, *J. Thermophys. Heat Trans.*, 2015, vol. 29, pp. 209–221. <https://doi.org/10.2514/1.T4000>
16. Brandis A.M., Johnson C.O., Cruden B.A., Non-equilibrium Radiation for Earth Entry. AIAA Paper 2016-3690. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3690>
17. Palumbo G., Craig R.A., Whiting E.W., Park C., Measured specific intensity from 130 to 900 nm at the stagnation point of a model in an arcjet flow of 7.8 km/sec, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1997, vol. 51, pp. 207–236. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(96\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(96)00138-0)
18. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Tunik V.Yu., Experimental study of air radiation behind a strong shock wave, *Acta Astronaut.*, 2022, vol. 194, pp. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.032>
19. Zalogin G.N., Kozlov P.V., Kuznetsova L.A., Losev S.A., Makarov V.N., Romanenko Yu.V., Surzhikov S.T., Radiation excited by shock waves in a CO₂-N₂-Ar mixture: experiment and theory, *Tech. Phys.*, 2001, vol. 46, pp. 654–661. <https://doi.org/10.1134/1.1379629>
20. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Akimov Yu.V., Levashov V.Yu., Gerasimov G.Ya., Teresa A.M., Development of a Technique for Recording the Intensity of the Emission of Gases behind the Front of Strong Shock Waves, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2021, vol. 15, pp. 652–658. <https://doi.org/10.1134/S1990793121040199>
21. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Akimov Yu.V., Levashov V.Yu., Gerasimov G.Ya., Teresa A.M., Technique for Recording the Intensity of the Emission of Gases behind the Front of Strong Shock Waves in the Region of Vacuum Ultraviolet Radiation, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2022, vol. 16, pp. 883–889. <https://doi.org/10.1134/S1990793122050049>
22. Kotov M.A., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., et al., Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity, *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 195, no. 117143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117143>
23. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Y., Levashov V.Y., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Y., Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M., Heat Flux Measurement in Shock Heated Combustible Gases and Clarification of Ignition Delay Time, *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 291, pp. 1–6. <https://doi.org/10.3390/fluids7090291>
24. Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Ibragimova L.B., Shatalov O.P., Study of radiation characteristics of argon behind the front of a strong shock wave, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/577/>
25. Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Ibragimova L.B., Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Shatalov O.P., Excitation and emission of argon behind the shock wave front at velocities of 4.5-7.8 km/s. I. Experimental study, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2017, vol. 18, no. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/686/>

26. Kozlov P.V., Levashov V.Yu, Zabelinsky I.E., Bikova N.G., Argon radiation behind of shock wave front, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1683. no. 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022026>
27. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Levashov V.Yu., Gerasimov G.Ya., Experimental study of argon radiation behind the front of a strong shock wave, *J. Appl. Spectrosc.*, 2021, vol. 88, pp. 306–310. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01174-8>
28. Kozlov P.V., Bykova N.G., Levashov V.Yu, Zabelinskii I.E., Nonequilibrium radiation behind shock waves in oxygen at speeds up to 10 km/s, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1250, no. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1250/1/012017>
29. Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Gerasimov G.Ya., Radiative characteristics of shock-heated oxygen, *J. Appl. Spectrosc.*, 2022, vol. 89, pp. 56–59. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01325-5>
30. Kozlov P.V., Experimental study of the radiation properties of air behind the shock wave front at speeds up to 10 km/s, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2016, vol. 17, no. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-1/articles/624/>
31. Zabelinsky I.E., Kozlov P.V., Akimov Yu.V., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Tunik Yu.V., Levashov V.Yu., Detonation initiation of strong shock waves for studying the radiation characteristics of high-temperature gases, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2021, vol. 15, pp. 977–983. <https://doi.org/10.1134/S1990793121060117>
32. Gerasimov G.Ya., Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Levashov V.Yu., Investigation of radiation characteristics of high-temperature gases, conducted in shock tubes, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2022, vol. 16, pp. 642–654. <https://doi.org/10.1134/S1990793122040194>
33. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Experimental study of the radiative characteristics of shock-heated air in the ultraviolet and visible regions of the spectrum, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 6, pp. 780–788. <https://doi.org/10.1134/S0015462822601322>
34. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Radiative characteristics of shock-heated air in the visible and infrared spectral regions, *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 5, pp. 960–967. <https://doi.org/10.1134/S0015462823601328>
35. Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Gerasimov G.Ya., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Study of radiation characteristics of shock-heated gases, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2023, vol. 96, pp. 1828–1838. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02852-4>
36. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Experimental study of radiation characteristics of a CO₂-N₂ mixture behind the front of a strong shock wave, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2021, vol. 15, pp. 989–994. <https://doi.org/10.1134/S1990793121060208>
37. Chai K.-B. and Kwon D.-H., Optical emission spectroscopy and collisional-radiative modeling for low temperature Ar plasmas, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2019, vol. 227, no. 1, pp. 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.015>
38. Levashov V.Yu., Kozlov P.V., Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Features of argon plasma radiation at the initial stage behind the shock wave front, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2021, vol. 15, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1134/S1990793121010097>
39. Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Kusov A.L., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Kozlov P.V., Experimental and theoretical study of absorption properties of shock-heated oxygen, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, no. 3 [in Russian]. <https://doi.org/10.33257/PhChGD.25.3.1105>
40. Bykova N.G., Kusov A.L., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Zabelinsky I.E., Spectral Model for Calculation of Radiation Characteristics of a Shock-Heated Gas, *Russ. J. Phys. Chem. B.*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 732–739. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700222>
41. Bykova N.G., Gerasimov I.G., Zabelinsky I.E., Ibragimova L.B., Shatalov O.P., Study of shock-heated air in the spectral region of 120-900 nm: panoramic spectrum and evolution of radiation behind the shock wave front, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2014, vol. 15, no. 2 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/114/>

42. Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Ibragimova L.B., Kozlov P.V., Stovbun S.V., Tereza A.M., Shatalov O.P., Radiation characteristics of air in the ultraviolet and vacuum ultraviolet regions of the spectrum behind the front of strong shock waves, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2018, vol. 12, pp. 108–114. <https://doi.org/10.1134/S1990793118010165>
43. Stovbun S.V., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Tereza A.M., Shatalov O.P., Vlasov P.A., *Evaluation of the Radiance of Shock-Heated Air in the 120–400-nm Spectral Range*, Proc. 31st Int. Symp. Shock Waves. 2019, Springer, vol. 1, pp. 361–368. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8_41
44. Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Emission of shock-heated air in the vacuum-ultraviolet region of the spectrum, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2023, vol. 17, pp. 1152–1159. <https://doi.org/10.1134/S1990793123050184>
45. Kozlov P.V., Experimental study of the evolution of NO radiation in the air at the velocities up to second cosmic, *J. Phys.: Conf. Series.*, 2018, vol. 1009, no. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1009/1/012024>
46. Kozlov P.V., Surzhikov S.T., Nonequilibrium Radiation NO in Shocked Air, AIAA Paper 2017–0157. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0157>
47. Brandis A.M., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D., McGilvray M., Morgan R.G., Analysis of air radiation measurements obtained in the EAST and X2 shock tube facilities, AIAA Paper 2010-4510. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4510>
48. <https://data.nasa.gov/docs/datasets/aerothermodynamics/EAST/index.html>
49. Kusov A.L., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Zabelinsky I.E., Kozlov P.V., Levashov V.Yu., Numerical investigation of radiation in a shock-heated mixture of CO₂ and N₂ by the method of direct statistical modeling, *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 6, pp. 1155–1167. <https://doi.org/10.1134/S0015462823601791>
50. Pavlov V.A., Gerasimov G.Ya., Measurement of ignition limits and induction times of hydrogen-air mixtures behind the front of an incident shock wave, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2014, vol. 87, pp. 1291–1297. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1132-z>
51. Pavlov V.A., Gerasimov G.Ya., Ignition of hydrogen-oxygen mixtures behind the front of an incident shock wave, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2016, vol. 89, pp. 587–591. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1415-7>
52. Pavlov V., Gerasimov G., Levashov V., Kozlov P., Zabelinsky I., Bykova N., Shock Tube Study of Ignition Delay Times for Hydrogen–Oxygen Mixtures, *Fire*, 2023, vol. 6, issue 11. <https://doi.org/10.3390/fire6110435>
53. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Ignition of propane-air mixtures in a shock tube at a pressure of 30 atm, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, no. 3 [in Russian]. <https://doi.org/10.33257/PhChGD.22.3.942>
54. Kozlov P.V., Akimov Yu.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Ignition of a propane-air mixture behind a reflected shock wave at high pressures, *High Temp.*, 2021, vol. 59, no. 2–6, pp. 240–244. <https://doi.org/10.1134/S0018151X21010107>
55. Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Akimov Yu.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., High-temperature ignition of propane-oxygen-argon mixtures in a shock tube at a pressure of 30 atm, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2021, vol. 15, pp. 827–832. <https://doi.org/10.1134/S1990793121050067>
56. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Shemyakin A.N., Soloviev N.G., Yakimov M.Yu., Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M., Registration of ignition of a combustible mixture in a shock tube using a thermoelectric detector, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2022, vol. 16, pp. 655–660. <https://doi.org/10.1134/S1990793122040236>
57. Kozlov P.V., Kotov M.A., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Experimental Study of the Ignition of a Stoichiometric Propylene–Oxygen–Argon Mixture Behind a Reflected Shock Wave, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 1019–1024. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700568>

58. Medvedev S.P., Agafonov G.L., Khomik S.V., Gelfand B.E., Ignition delay in hydrogen-air and syn-gas-air mixtures: Experimental data interpretation via flame propagation, *Combust. Flame.*, 2010, vol. 157, pp. 1436–1438. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.03.003>
59. Gerasimov G.Ya., Shatalov O.P., Kinetic mechanism of combustion of hydrogen-oxygen mixtures, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2013, vol. 86, pp. 987–995. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0919-7>
60. Horning D.C., Davidson D.F., Hanson R.K., Study of the High-Temperature Autoignition of *n*-Alkane/O₂/Ar Mixtures, *J. Propul. Power*, 2002, vol. 18, pp. 363–371. <https://doi.org/10.2514/2.5942>
61. Penyazkov O.G., Ragotner K.A., Dean A.J., Varatharajan B., Autoignition of propane–air mixtures behind reflected shock waves, *Proc. Combust. Inst.*, 2005, vol. 30, pp. 1941–1947. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.122>
62. Brown C.J., Thomas G.O., Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures, *Combust. Flame*, 1999, vol. 117, pp. 861–870. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(98\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(98)00133-3)
63. Burcat A., Lifshitz A., Scheller K., Skinner G.B., Shock-tube investigation of ignition in propane-oxygen-argon mixtures, *Symp. (Int.) Combust.*, 1971, vol. 13, pp. 745–755. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80077-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80077-2)
64. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Yu., Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M., Thermoelectric detector application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture, *Acta Astronaut.*, 2023, vol. 204, pp. 787–793. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.036>
65. Kotov M.A., Kozlov P.V., Osipenko K.Yu., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Study of ionization processes before a strong shock wave, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2023, vol. 15, pp. 1160–1167. <https://doi.org/10.1134/S1990793123050226>
66. Kotov M.A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Osipenko K.Yu., Bykova N.G., Zabelinsky I.E., Precursor electrons formation before strong shock wave, *Acta Astronaut.*, 2024, vol. 217, pp. 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.035>
67. Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Kotov M.A., Measurement of the Electron Concentration in the Vicinity of a Strong Shock Wave, *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2024, vol. 18, no. 3, pp. 725–731. <https://doi.org/10.1134/S1990793124700210>
68. Katsurayama H., Matsuda A., Abe T., Preliminary Investigation of Thermochemical Nonequilibrium behind a Strong Shock Wave with Precursor Photoionization in Argon. AIAA Paper 2007-4552. <https://doi.org/10.2514/6.2007-4552>
69. Omura M., Presley L.L., Electron Density Measurements ahead of Shock Waves in Air, *AIAA J.*, 1969, vol. 7, pp. 2363–2365. <https://doi.org/10.2514/3.5554>
70. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Spectroscopic measurement of electron concentration in shock-heated gas, *J. Appl. Spectrosc.*, 2024, vol. 91, pp. 775–779. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01784-y>

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.