УДК 541.124

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНО-НАГРЕТОГО ВОЗДУХА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ И ВИДИМОЙ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

© 2022 г. П. В. Козлов^{*a*}, И. Е. Забелинский^{*a*}, Н. Г. Быкова^{*a*}, Г. Я. Герасимов^{*a*}, В. Ю. Левашов^{*a*,*,**}

^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

*E-mail: vyl69@mail.ru **E-mail: levashovvy@imec.msu.ru Поступила в редакцию 29.06.2022 г. После доработки 25.07.2022 г. Принята к публикации 25.07.2022 г.

Представлены результаты измерения интегральных и временных спектральных характеристик ударно-нагретого воздуха. Эксперименты проведены на модифицированной двухдиафрагменной ударной трубе DDST-M Института механики МГУ в интервале скоростей ударной волны от 7.5 до 11.4 км/с при давлении перед фронтом ударной волны $p_0 = 0.25$ Торр. Исследован диапазон волн излучения $\lambda = 190-670$ нм, соответствующий ультрафиолетовой и видимой областям спектра, в которых основной вклад в излучение дают молекулярные полосы. Проведен анализ полученных интегральных по времени спектрограмм излучения. Выделены особенности временных осциллограмм для наиболее типичных молекулярных линий спектра. Данные измерений сравниваются с экспериментальными данными других авторов.

Ключевые слова: ударные волны, излучение, воздух, ударная труба, ультрафиолетовая и видимая области спектра, молекулярные полосы излучения **DOI:** 10.31857/S056852812260045X

Дальнейшее развитие космической отрасли тесно связано с необходимостью создания надежных систем теплозащиты для вновь разрабатываемых космических аппаратов [1]. Это в свою очередь требует достоверной оценки тепловых потоков к поверхности спускаемого космического аппарата при его движении в атмосфере Земли, которая в настоящее время остается очень низкой [2]. Влияние различных физико-химических процессов на тепловой нагрев поверхности аппарата особенно сильно проявляется на больших высотах, где помимо конвективной составляющей нагрева большое значение имеет его радиационная составляющая, которая при сверхорбитальных скоростях входа спускаемого аппарата в атмосферу Земли становится преобладающей [3]. Существующая неопределенность в оценке роли различных неравновесных процессов, протекающих за сильными ударными волнами, стимулирует дальнейшие исследования по измерению спектральных характеристик ударно-нагретого воздуха, результаты которых могут использоваться как для определения тепловых потоков, так и для тестирования расчетно-теоретических моделей [4].

Широкие возможности для изучения неравновесных физико-химических процессов за сильными ударными волнами и тестирования компьютерных моделей, описывающих обтекание спускаемых космических аппаратов при их движении в верхних слоях атмосферы, предоставляют эксперименты на различных газодинамических установках [5]. В первую очередь это относится к ударным трубам, которые являются одним из основных источников экспериментальных данных по радиационным характеристикам высокотемпературных газов. В настоящее время в мировой практике эксплуатируется большое количество ударных труб, отличающихся друг от друга размерами, конструкцией и целью проводимых исследований. Достаточно полное описание действующих ударных установок, а также полученной с их помощью экспериментальной информации по излучению ударно нагретых газов приведено в недавних обзорах [6, 7].

В настоящей работе представлены новые экспериментальные данные по спектрам излучения ударно-нагретого воздуха в ультрафиолетовом (UV) и видимом (VIS) диапазонах. Работа являет-

ся продолжением цикла исследований неравновесного излучения воздуха и его составляющих, выполненных на ударных трубах экспериментального комплекса "Ударная труба" Института механики МГУ, применительно к условиям входа спускаемых космических аппаратов в плотные слои атмосферы Земли с орбитальными и сверхорбитальными скоростями [8–12].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование излучения воздуха за сильной ударной волной проводилось на модернизированной двухдиафрагменной ударной трубе (DDST-M) Института механики МГУ, имеющей цилиндрическую форму с внутренним диаметром 5 см. Инициирование ударной волны осуществлялось за счет воспламенения в камере высокого давления стехиометрической смеси кислорода с водородом, разбавленной гелием. Модернизация ударной установки заключалась во включении в ее конструкцию дополнительного элемента — форкамеры, которая отделяет торцевую стенку трубы с поджигающим устройством от основного объема камеры высокого давления перфорированным диском. Подобная конструкция позволяет увеличить энергоэффективность установки за счет более полного сгорания горючей смеси в камере высокого давления и достичь скорость ударной волны в воздухе, равную 11.4 км/с при начальном давлении газа перед ударной волной 0.25 Торр. При этом наблюдается практически полная повторяемость результатов эксперимента. Схема установки и более подробное описание ее принципа действия приведены в [13].

Система регистрации на ударной трубе DDST-M позволяет измерять излучательные характеристики ударно нагретого газа, проходящего мимо двух измерительных сечений трубы. Первый измерительный канал, регистрирующий интегральную по времени плотность излучения газа (панорамный спектр) в UV/VIS спектральном диапазоне ($\lambda = 190-670$ нм), включает спектрограф Horiba 1824 и линейный CDD-детектор Hamamatsu S11156. Канал, регистрирующий во втором измерительном сечении временную эволюцию излучения в трех специально выделенных с помощью монохроматоров узких спектральных диапазонах, собран на базе двух спектрографов Horiba 1061 и спектрографа B&M50, которые фиксируют осциллограммы излучения на ФЭУ R446 Нататаtsu и ФЭУ R4420 Нататаtsu соответственно. Пространственное разрешение оптической схемы регистрации временной эволюции составляет 0.53 мм, что соответствует временному разрешению 53 нс при скорости ударной волны $V_{SW} = 10$ км/с. С учетом временного разрешения электрической схемы регистрации на нагрузочном сопротивлении на ФЭУ, равном 50 Ом, временное разрешение не превышает 70 нс.

Для получения спектральных характеристик излучения в абсолютных энергетических единицах (Дж/м²/мкм/ср) проводится предварительная калибровка измерительной системы. 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 I_{λ} в единицах Дж/м³/мкм/ср. Более подробно процедура калибровки системы регистрации приведена в [14].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение интегральных и временных спектральных характеристик ударно нагретого воздуха проводилось в интервале скоростей ударной волны от 7.5 до 11.4 км/с при давлении перед фронтом ударной волны $p_0 = 0.25$ Торр. Исследована спектральная область $\lambda = 190-670$ нм, в которой основной вклад в излучение дают молекулярные полосы молекул N₂ и NO, радикалов CN

и молекулярных ионов N₂⁺. Анализ интегральных и временных спектральных характеристик позволяет выделить закономерности излучения ударно нагретого воздуха на различных участках движения спускаемого космического аппарата в атмосфере Земли.

Типичная спектрограмма интегрального излучения воздуха, полученная при скорости ударной волны $V_{SW} = 10$ км/с, приведена на рис. 1. Видно, что в спектральном диапазоне $\lambda = 190-300$ нм регистрируется в основном излучение системы полос β , γ и δ молекулы NO, которая образуется в результате переходов $B^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$, $A^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$ и $C^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$ соответственно [9]. Незначительный вклад в излучение в этом диапазоне может вносить система Шумана-Рунге молекулярного кислорода, возникающая за счет электронного перехода $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ [12]⁻. В интервале длин волн $\lambda = 275-400$ нм наблюдается вторая положительная система полос молекулы азота N₂(2+), опи-



Рис. 1. Панорамный спектр излучения ударно нагретого воздуха при начальном давлении $p_0 = 0.25$ Торр и скорости ударной волны $V_{SW} = 10$ км/с.

сываемая переходом $C^3\Pi_u \to B^3\Pi_g$ [8]. Этот интервал частично перекрывается достаточно интенсивной системой полос молекулярного иона N_2^+ (первая отрицательная система, $\lambda = 300-500$ нм), образующейся в результате электронного перехода $B^2\Sigma_u^+ \to X^2\Sigma_g^{+-}$.

На спектрограмме, показанной на рис. 1, приведен также ряд дополнительных полос, связанных с присутствием в исследуемом воздухе различных примесей и, в частности, углекислого газа. В первую очередь это относится к фиолетовой системе полос цианистого радикала CN ($\lambda = 330-425$ нм), которая формируется в электронном переходе $B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$ [15], и атомарным линиям углерода. Наблюдаются линии излучения радикала OH ($\lambda = 307-317$ нм) и атома водорода (H_{α} и H_{β}), которые хорошо контролируют содержание в исследуемом воздухе паров воды. На спектрограмме присутствуют также линии Na ($\lambda = 589$ нм), ионов Ca ($\lambda = 393$ и 397 нм) и C ($\lambda = 193$ и 248 нм). Излучение линий натрия обусловлено присутствуем солей натрия в воздухе, которые адсорбируются на стенках ударной трубы во время ее открытия при замене диафрагм. Для ионов кальция излучение связано, скорее всего, с люминесценцией кварцевого стекла окон наблюдения под действием сильного излучения в области вакуумного ультрафиолета. Линии углерода проявляются в спектре из-за присутствия углерод содержащих примесей в воздухе (например, CO₂). Иногда появляющееся излучение линий меди на длинах волн 325 и 327 нм вызвано использованием медных диафрагм.

Для перехода в панорамном спектре от объемной плотности энергии излучения J_{λ} к объемной мощности излучения B_{λ} , обычно измеряемой в единицах Bt/(см³/мкм/ср), необходимо приведенные выше спектральные данные разделить на эффективное время излучения $\Delta \tau$ (мкс) в каждом узком диапазоне спектра. Данная процедура требует информации по временным характеристикам излучения отдельных спектральных линий. Алгоритм определения $\Delta \tau$ состоит в замене временной осциллограммы излучения, регистрируемой на определенной длине волны, на равный ей по площади прямоугольник, высота которого равна максимальному значению мощности излучения на осциллограмме. Ширина прямоугольника и принимается равной эффективному времени излучения $\Delta \tau$ на данной длине волны [16]. Таким образом, совместное использование данных панорамного спектра с результатами временных исследований может дать правильную информацию об объемной мощности излучения B_{λ} различных спектральных полос.

Временная зависимость интенсивности излучения на длинах волн: $\lambda = 213$, 391 и 420 нм для спектрального интервала $\Delta \lambda = 4$ нм приведена на рис. 2. Излучение на длине волны 213 нм входит в спектральную систему полос молекулы NO. Излучение на длинах волн 391 и 420 нм принадлежит первой отрицательной системе полос молекулярного иона N₂. Как видно из рисунка, линия



Рис. 2. Эволюция интенсивности излучения на длинах волн $\lambda = 213$, 391и 420 нм в ударно- нагретом воздухе при $p_0 = 0.25$ Торр, $V_{SW} = 10$ км/с и ширине спектрального интервала $\Delta \lambda = 4$ нм.

излучения NO характеризуется резким всплеском излучения в интервале времени t от нуля до 0.25 мкс, что связано с неравновесностью протекания процесса. Далее излучение переходит в равновесную стадию с последующим быстрым затуханием интенсивности к моменту t = 2.5 мкс.

Излучение двух линий системы $N_2^+(1-)$ имеет несколько иной характер. Неравновесная зона растянута во времени до момента *t* = 2.0 мкс, а равновесная зона не имеет четко выраженного характера, представляя собой плавно затухающую интенсивность излучения до момента *t* = 8 мкс. Обе спектральные кривые примерно повторяют друг друга, но пик интенсивности у линии $\lambda = 391$ нм примерно вдвое больше, чем у линии $\lambda = 420$ нм.

Поведение временных спектральных характеристик ударно нагретого воздуха зависит не только от длины волны излучения, но и от скорости распространения ударной волны. На рис. 3 показано изменение интенсивности излучения линии $\lambda = 213$ нм молекулы NO при различных значениях величины V_{SW} . 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.

Данные по временным спектральным характеристикам позволяют вычислить эффективное время излучения $\Delta \tau$ на выделенных длинах волн излучения λ с помощью процедуры, описанной выше. На рис. 4 приведена зависимость времени $\Delta \tau$ от скорости ударной волны V_{SW} для различных значений длины волны λ . Видно, что величина $\Delta \tau$ увеличивается с ростом V_{SW} для всех длин волн. При скоростях $V_{SW} \ge 11$ км/с эффективное время излучения на длине волны $\lambda = 213$ нм начинает уменьшаться. Это может быть объяснено сокращением длительности светящейся области за ударной волны λ показана на рис. 5. Анализ приведенных данных показывает, что $\Delta \tau$ растет с увеличением λ , достигая максимума при значениях λ порядка 650 нм.

Зависимость панорамного спектра ударно нагретого воздуха от скорости ударной волны $V_{\rm SW}$ в рассматриваемом диапазоне длин волн приведена на рис. 6. Пересчет с объемной плотности энергии излучения I_{λ} к объемной мощности излучения B_{λ} осуществлялся с использованием значений эффективного времени излучения $\Delta \tau$ для длины волны $\lambda = 213$ нм, взятых из рис. 4. Наблюдается увеличение интенсивности излучения с ростом $V_{\rm SW}$. При скоростях ударной волны



Рис. 3. Временная зависимость интенсивности излучения на длине волны $\lambda = 213$ нм молекулы NO в ударнонагретом воздухе при $p_0 = 0.25$ Торр и различных значениях скорости ударной волны V_{SW} и ширине спектрального интервала $\Delta \lambda = 4$ нм.



Рис. 4. Зависимость эффективного времени излучения различных спектральных линий от скорости ударной волны.

выше 10 км/с это увеличение замедляется, что связано с диссоциацией молекул при повышении температуры исследуемого газа за фронтом ударной волны. Основную роль в излучении ударно нагретого воздуха начинают играть атомы азота и кислорода, эмиссионные линии которых лежат в основном в спектральной области вакуумного ультрафиолета (переходы в основное состояние) и инфракрасном диапазоне.

Изучение радиационных характеристик ударно нагретого воздуха применительно к условиям входа космических аппаратов в атмосферу Земли с орбитальными и сверхорбитальными скоростями проводилось ранее с использованием различных ударных установок. К ним в первую очередь относятся электроразрядная установка EAST, эксплуатируемая в Исследовательском центре NASA Ames (США) [17], поршневая ударная установка T6 Stalker, являющаяся результатом



Рис. 5. Зависимость эффективного времени излучения от длины волны при $p_0 = 0.20 - 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10$ км/с.

совместной работы Оксфордского университета и Центра гиперзвуковых исследований Университета Квинсленда [18], а также крупномасштабный ударный туннель LENS XX, функционирующий в Исследовательском центре CUBRC (Буффало, США) [19]. В связи с этим представляется интересным сравнение результатов измерения спектральных характеристик воздуха, полученных на ударной трубе DDST-M, с результатами исследований на этих установках.

Результаты, полученные на зарубежных установках [17–19], достаточно хорошо согласуются между собой, так как методика регистрации излучения на них одинакова (так называемая 2Dспектроскопия изображения) [20]. Для сравнения были выбраны результаты с установки EAST, как наиболее полно представленные в виде базы первичных экспериментальных данных [21]. На рис. 7 показаны панорамные спектры ударно нагретого воздуха, полученные на установке EAST для скорости 10 км/с и начального давления 0.2 Торр и наши результаты для той же скорости и начального давления 0.25 Торр. Равновесные интенсивности излучения на установке EAST (черная линия) получены из базы экспериментальных данных [21] и совпадают с данными работ [17–19, 22, 23]. На рисунке представлены также данные из работ [21, 23] для суммарного излучения, полученного из неравновесной и равновесной зон на установке EAST (красная линия).

Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает, что все спектрограммы в общих чертах повторяют друг друга. Данные настоящей работы лежат несколько выше суммарного излучения, полученного на установке EAST. Различие обусловлено в основном тем, что при обработке наших экспериментов используется минимальное нормированное время (см. рис. 5) в диапазоне $\lambda = 200-670$ нм, которое характерно для диапазона $\lambda = 200-300$ нм. Для других длин волн это время может быть в несколько раз больше. Поэтому полученные в наших экспериментах интенсивности должны быть во столько же раз меньше. Наибольшее различие наблюдается в области спектра $\lambda = 370-420$ нм, где большую роль играет излучение радикала CN, концентрация которого сильно зависит от содержания в исследуемом воздухе CO₂. Также существенную роль играет абсорбция углеводородов на стенках ударной трубы. В экспериментах на установке EAST для удаления со стенок трубы углеродсодержащих примесей используется источник кислородной плазмы, что существенно уменьшает уровень излучения циана [22].

В экспериментах на установках EAST, T6 и LENS XX, как правило, фиксируется излучение из равновесной зоны ударной волны [17–19]. Равновесная зона выбирается за фронтом ударной волны, где интенсивность излучения практически не меняется. В наших экспериментах из всей излучающей зоны (неравновесной и равновесной) ССD приемник накапливает (суммирует) излучение на каждой длине волны (пикселе). В работе [23] приводятся отдельно спектры из неравновесной зоны, но там вводится понятие неравновесной метрики, которая усредняет спектральное распределение излучения в зоне ± 2 см от максимальной интенсивности за фронтом ударной волны. Такие значения существенно ниже неравновесных значений интенсивности излучения, получаемых при обработке только пиковых интенсивностей из базы данных [21]. Введение понятия неравновесной метрики в информации, имею-



Рис. 6. Панорамный спектр излучения ударно нагретого воздуха при начальном давлении $p_0 = 0.25$ Торр и различных скоростях ударной волны $V_{SW} = 9.1$ (a); 10.0 (б) и 10.8 (в) км/с.

щей наименьшую ошибку при обработке экспериментов, для построения моделей неравновесного излучения [24].

Необходимо также отметить, что в экспериментах на EAST время экспозиции изображения на спектрометрах составляет 0.25–0.5 мкс. Поэтому неравновесная зона в них не ярко выражена. В наших экспериментах длительность неравновесной зоны может быть меньше 0.1 мкс по уровню 0.5. В большинстве спектрограмм, полученных на установке EAST, за ударной волной присутствует сильно светящаяся область толкающего газа. Излучение в равновесной зоне в большинстве спектретрию к возрастанию. Авторы объясняют такое поведение со значи-

ИЗВЕСТИЯ РАН. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА № 6 2022



Рис. 7. Сравнение панорамных спектров излучения воздуха, полученных на ударной трубе DDST-M при $p_0 =$ = 0.25 Торр и V_{SW} = 10.0 км/с и ударной установке EAST при p_0 = 0.2 Торр и V_{SW} = 10 км/с [21]. Данные EAST пересчитаны для равновесной (черная линия) и суммы равновесной и неравновесной областей излучения (красная линия)..

тельным замедлением ударной волны, которое может составлять до 10% на 1.5 м перед измерительным окном [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных измерений показывают, в исследованном спектральном диапазоне $(\lambda = 190-670 \text{ нм})$ регистрируется в основном излучение системы полос β , γ и δ молекулы NO, второй положительной системы полос молекулы N₂ и первой отрицательной системы полос молекулярного иона N_{2}^{+} .

Поведение временных спектральных характеристик зависит не только от длины волны излучения, но и от скорости распространения ударной волны. Временные спектральные характеристики позволили вычислить эффективное время излучения $\Delta \tau$ на выделенных длинах волн излучения, которые используются для пересчета данных панорамного спектра с объемной плотности энергии излучения I_{λ} к объемной мощности излучения B_{λ} .

Сравнение измеренного панорамного спектра ударно нагретого воздуха при $V_{SW} = 10.0$ км/с и $p_0 = 0.25$ Торр с экспериментальными данными, полученными при тех же условиях на других ударных установках, показывает, что все спектрограммы в общих чертах повторяют друг друга. Данные настоящей работы лежат несколько выше результатов других измерений. Это может быть объяснено различными методиками определения средней мощности излучения при обработке полученных экспериментальных данных, а также тем, что в экспериментах на других установках, как правило, приводятся спектры из равновесной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Uyanna O., Najafi H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects // Acta Astronaut. 2020. V. 176. P. 341-356.
- 2. Brandis A.M., Johnson C.O., Cruden B.A. Investigation of non-equilibrium radiation for Earth entry // AIAA Paper 2016-3690. 19 p.
- 3. Суржиков С.Т. Расчет неравновесного излучения ударных волн в воздухе с использованием двух моделей // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 99–114.

92

- 4. Lino da Silva M., Rerreira 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. 11 p.
- 5. *Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И.* Экспериментальное и численное исследование теплообмена высокоэнтальпийных недорасширенных струй воздуха с цилиндрическими моделями // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 5. С. 125–133.
- Reyner P. Survey of high-enthalpy shock facilities in the perspective of radiation and chemical kinetics investigations // Prog. Aerospace Sci. 2016. V. 85. P. 1–32.
- Gu S., Olivier H. Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities // Prog. Aerospace Sci. 2020. V. 113. № 100607. 27 p.
- 8. *Dikalyuk A.S., Surzhikov S.T., Kozlov P.V., Shatalov O.P., Romanenko Yu.V.* Nonequilibrium spectral radiation behind the shock waves in Martian and Earth atmospheres // AIAA Paper 2013–2505. 27 p.
- 9. Kozlov P.V., Surzhikov S.T. Nonequilibrium radiation NO in shocked air // AIAA Paper 2017–0157. 16 p.
- 10. 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 // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 35–41.
- 11. 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 // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 23–28.
- 12. Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я. Излучательные характеристики ударно-нагретого кислорода // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Т. 89. № 1. С. 64–68.
- 13. 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 // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 11. С. 22–28.
- Залогин Г.Н., Козлов П.В., Кузнецова Л.А., Лосев С.А., Макаров В.Н., Романенко Ю.В., Суржиков С.Т. Излучение смеси CO₂-N₂-Ar в ударных волнах: эксперимент и теория // Журн. техн. физики. 2001. Т. 71. № 6. С. 10-16.
- Ridenti M.A., Amorim J. CN (B²Σ⁺ → X²Σ⁺) Violet System in a Cold Atmospheric-Pressure Argon Plasma Jet // Plasma Chem. Plasma Process. 2018. V. 38. P. 311–329.
- 16. 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 // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 26–33.
- 17. 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. 23 p.
- 18. Collen P.L., Doherty L.J., McGilvray M. Measurements of radiating hypervelocity air shock layers in the T6 freepiston driven shock tube // Intern. Conf. FAR-2019. 2019. № 1053360.
- 19. Parker R., Dufrene A., Holden M., Wakeman T. Shock-front emission measurements at 10 km/s // AIAA Paper 2011–715. 11 p.
- 20. *Greenberg R.B., Cruden B.A., Grinstead J.H., Yeung, D.* Collection optics for imaging spectroscopy of an electric arc shock tube // Proc. SPIE 7429, Novel Optical Systems Design and Optimization XII. 2009. № 74290H.
- 21. https://data.nasa.gov/docs/datasets/aerothermodynamics/EAST/index.html
- Cruden B., Martinez R., Grinstead J., Olejniczak J. Simultaneous Vacuum Ultraviolet through Near IR Absolute Radiation Measurement with Spatiotemporal Resolution in an Electric Arc Shock Tube // AIAA Paper 2009– 4240. 13 p.
- 23. Brandis A.M., Cruden B.A. Benchmark Shock Tube Experiments of Radiative Heating Relevant to Earth Reentry // AIAA Paper. 2017–1145. 15 p.
- 24. Brandis A., Johnston C., Cruden B., Prabhu D. Investigation of Nonequilibrium Radiation for Mars Entry // AIAA Paper. 2013–1055. 16 p.

ИЗВЕСТИЯ РАН. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА № 6 2022