

УДК 533.9:533.6.071.8:541.124

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО НАГРЕТОГО ВОЗДУХА В ВИДИМОЙ И ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

© 2023 г. П. В. Козлов<sup>а</sup>, И. Е. Забелинский<sup>а</sup>, Н. Г. Быкова<sup>а</sup>,  
Г. Я. Герасимов<sup>а</sup>, В. Ю. Левашов<sup>а,\*,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: vyl69@mail.ru

\*\*e-mail: levashovvy@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 06.06.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Измерены интегральные и временные спектральные характеристики ударно нагретого воздуха в интервале скоростей ударной волны от 7.35 до 10.4 км/с при давлении перед фронтом ударной волны  $p_0 = 0.25$  Торр. Эксперименты проведены на ударной установке DDST-М Института механики МГУ. Исследован диапазон волн излучения  $\lambda = 600\text{--}1100$  нм, соответствующий видимой и ближней инфракрасной областям спектра, в которых основной вклад в излучение дают атомарные линии азота и кислорода. Проведен анализ полученных интегральных по времени спектрограмм излучения. Выделены особенности временных осциллограмм для наиболее типичных атомарных линий спектра. Данные измерений сравниваются с экспериментальными данными других авторов.

*Ключевые слова:* ударные волны, излучение, воздух, ударная труба, видимая и инфракрасная области спектра, атомарные линии излучения

DOI: 10.31857/S1024708423600148, EDN: TMYOVI

Оценка воздействия тепловых потоков на поверхность спускаемого космического аппарата при маневре торможения в атмосферах различных планет представляет большой интерес в связи с проектами новых миссий на Луну, Марс и Венеру [1, 2]. Расчет теплового потока должен учитывать как конвективную, так и радиационную его составляющую [3]. Последняя растет с увеличением скорости и размеров спускаемого аппарата. При сверхорбитальных скоростях входа космического аппарата в атмосферу Земли и его размерах более 3 м радиационные процессы оказывают существенное влияние на газодинамическое течение [4]. Поэтому учет вклада радиационных процессов в общий тепловой поток к поверхности спускаемого аппарата является определяющим при разработке систем теплозащиты для вновь разрабатываемых космических аппаратов [5].

Тестирование расчетных моделей, описывающих радиационные потоки, требует достоверных экспериментальных данных, полученных на различных газодинамических установках в широком диапазоне параметров течения [6]. В первую очередь это относится к ударным трубам, которые являются одним из основных источников экспериментальных данных по радиационным характеристикам высокотемпературных газов [7–11]. В настоящей работе представлены новые экспериментальные данные по спектрам излучения ударно нагретого воздуха в видимом (VIS) и инфракрасном (IR) диапазонах, полученные при скоростях ударной волны, близких к суперорбитальной скорости. Работа является продолжением цикла исследований неравновесного излучения воздуха и его составляющих, выполненных на ударных установках Института механики МГУ в ультрафиолетовом (UV) диапазоне [12, 13].

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерение радиационных характеристик воздуха в VIS/IR диапазоне спектра излучения за сильной ударной волной проводилось на ударной установке DDST-М Института механики МГУ, описание и принцип работы которой приведены в [14]. Установка представляет собой ци-

линдрическую двух-диафрагменную ударную трубу с внутренним диаметром 5 см, которая состоит из трех секций: камеры высокого давления длиной 1.55 м, промежуточной камеры длиной 3.5 м и камеры низкого давления длиной 3 м. Камера промежуточного давления заполнена гелием, а камера низкого давления – исследуемой газовой смесью. Инициирование ударного процесса производится за счет воспламенения в камере высокого давления стехиометрической смеси кислорода и водорода, разбавленной гелием.

Ударная установка DDST-M оснащена соответствующей аппаратурой, позволяющей измерять интегральные и временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха в изучаемом спектральном диапазоне. Интегральное распределение интенсивности излучения (панорамный спектр) фиксируется спектрографом Horiba 1603 и линейным CDD-детектором Hamamatsu S11156 в зависимости от скорости ударной волны и начального давления воздуха перед фронтом ударной волны в области длин волн  $\lambda = 500\text{--}1100$  нм. Анализ подобных панорамных спектров позволяет выделить закономерности излучения ударно нагретого воздуха в различных спектральных диапазонах на различных участках траектории движения спускаемого космического аппарата в атмосфере Земли.

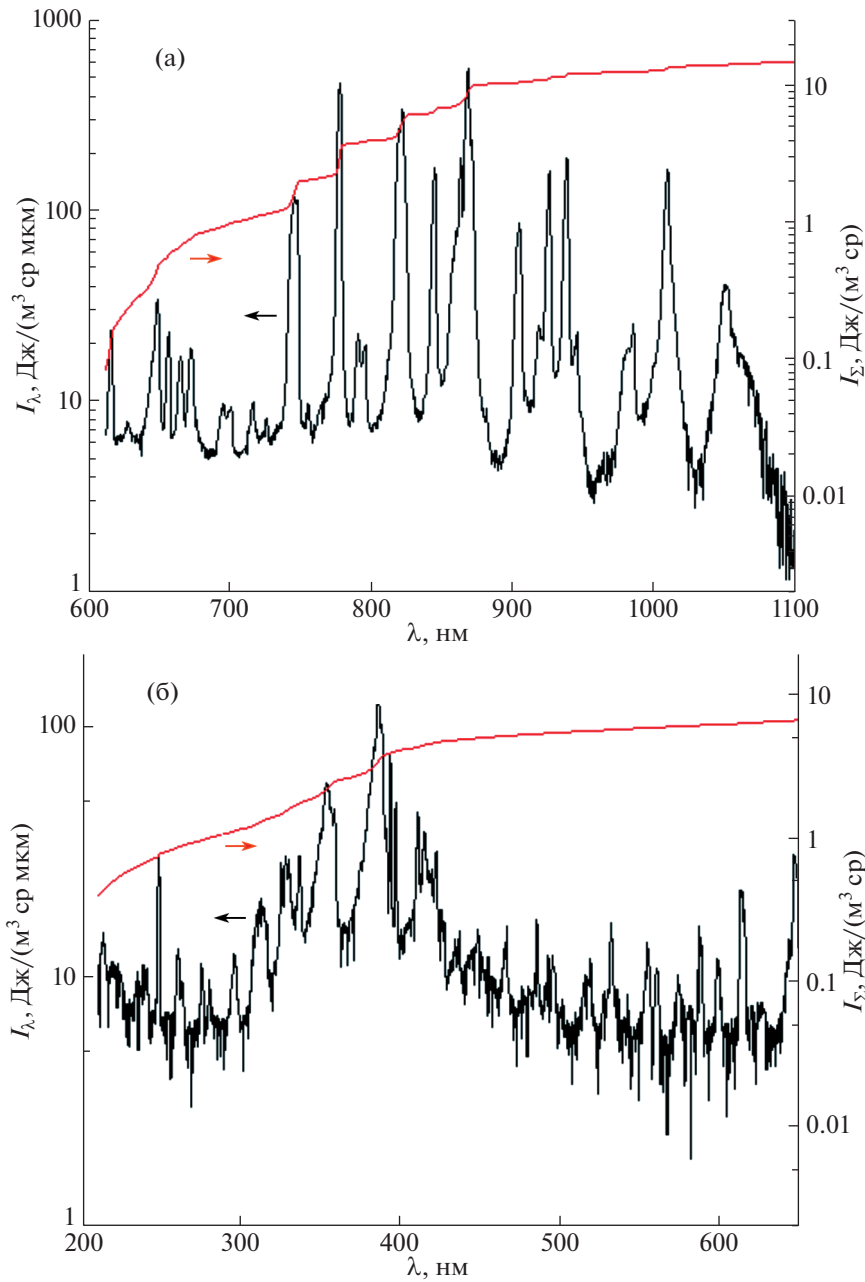
Для исследования временной эволюции излучения используются три канала регистрации на ФЭУ узких спектральных диапазонов, выделенных с помощью монохроматоров. Измерительный канал В&М собран на базе спектрографа В&М50, который фиксирует осциллограммы излучения на ФЭУ R4420 Hamamatsu. Измерительные каналы И I и И II состоят из спектрографов Horiba 1061 и Horiba 1603, соответственно, которые регистрируют излучение на ФЭУ R446 Hamamatsu. Пространственное разрешение оптической системы и полоса пропускания системы регистрации позволяют измерять временное распределение спектральной плотности с высоким временным разрешением (порядка 20 нс). Исследование временной эволюции отдельных спектральных линий дает дополнительную информацию о кинетических процессах в неравновесной зоне излучения. Такие данные не могут быть получены методом 2-D спектроскопии [15], который широко используется при обработке экспериментальных результатов, полученных на зарубежных ударных установках.

Экспериментальные результаты по излучению ударно нагретого воздуха представляются в абсолютных единицах в виде объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$ , измеряемой в Дж/(м<sup>3</sup>·мкм·ср). Для этого проводится предварительная калибровка измерительной системы, которая состоит в сравнении излучения ударно нагретого газа с излучением эталона (вольфрамовых и дейтериевых ламп). Процедура калибровки подробно описана в [16]. Для перехода в панорамном спектре от объемной плотности  $I_\lambda$  к объемной мощности излучения  $B_\lambda$ , измеряемой в единицах Вт/(см<sup>3</sup>·мкм·ср), необходимо разделить объемную плотность на эффективное время излучения  $\Delta t$  (мкс), которое определяется из временных осциллограмм для каждого узкого диапазона спектра.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Интегральные и временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха измерены в интервале скоростей ударной волны  $V_{sw}$  от 7.5 до 11.4 км/с при начальном давлении  $p_0$  в камере низкого давления 0.25 Торр в диапазоне волн излучения  $\lambda = 600\text{--}1100$  нм, который соответствует видимой и ближней инфракрасной областям спектра. Полученная информация расширяет базу экспериментальных данных по радиационным характеристикам высокотемпературного воздуха, полученных ранее на ударной установке DDST-M в UV/VIS диапазоне при скоростях ударной волны, близких к суперорбитальной скорости [13].

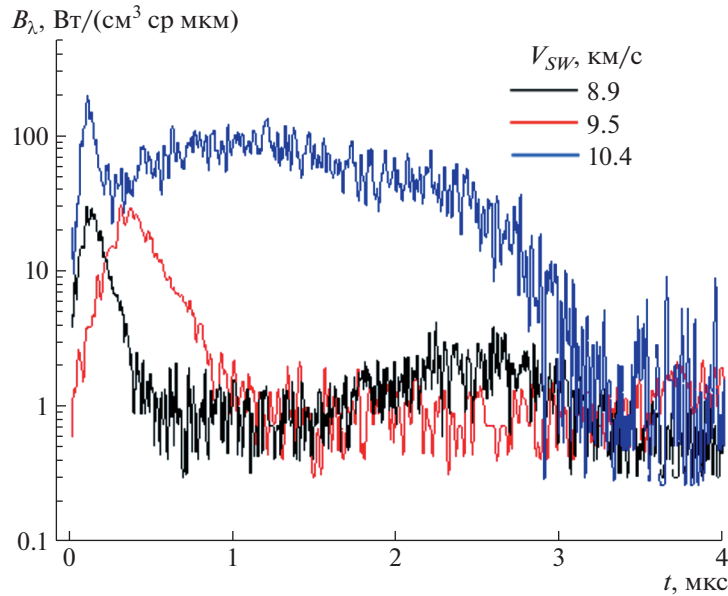
На рис. 1а приведена спектрограмма интенсивности излучения  $I_\lambda$  воздуха (панорамный спектр) в VIS/IR диапазоне, полученная при  $p_0 = 0.25$  Торр и  $V_{sw} = 10.5$  км/с. Анализ спектрограммы показывает, что в рассматриваемом диапазоне длин волн основной вклад в излучение дают атомарные линии азота и кислорода в отличие от соответствующей спектрограммы для UV/VIS диапазона, приведенной на рис. 1б, где регистрируется в основном излучение молекулярных полос NO( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), N<sub>2</sub>(2+), N<sub>2</sub><sup>+</sup>(1–) и CN [13]. На спектрограмме идентифицирована серия мультиплетов атома азота с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 648, 665, 747, 822, 868, 939, 986, 1011$  и  $1054$  нм, а также серия мультиплетов атома кислорода с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 616, 646, 700, 725, 777, 822, 845, 882$  и  $926$  нм [17, 18]. В спектре присутствуют также мультиплеты атома углерода с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 834, 910$  и  $941$  нм и линия H $_{\alpha}$  бальмеровской серии атома водорода с длиной волны  $\lambda = 656$  нм.



**Рис. 1.** Спектральная  $I_\lambda$  и суммарная  $I_\Sigma$  плотность излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR (а) и UV/VIS (б) спектральных диапазонах при начальном давлении  $p_0 = 0.25$  Торр и скорости ударной волны  $V_{\text{SW}} = 10.5$  км/с.

Причины появления атомарных линий углерода и водорода в спектре излучения ударно нагретого воздуха связаны с присутствием в окружающем воздухе  $\text{CO}_2$ , паров воды и углеродсодержащих примесей, для удаления которых требуются дополнительные меры.

На рис. 1 приведена также суммарная плотность излучения  $I_\Sigma$  в VIS/IR и UV/VIS спектральных диапазонах, по которой можно оценить вклад этих диапазонов в общую интенсивность излучения. Видно, что суммарное излучение в интервале длин волн  $\lambda = 600\text{--}1100$  нм примерно в два раза больше соответствующей величины для диапазона длин волн  $\lambda = 200\text{--}600$  нм, что согласуется с результатами измерений интенсивности излучения, полученными на электроразрядной ударной установке EAST (Electric Arc Shock Tube), эксплуатируемой в Исследовательском центре NASA Ames [19]. Следует отметить, что UV/VIS спектральная область является одной из наиболее сложных областей для моделирования, так как, с одной стороны, в ней преобладает фоно-



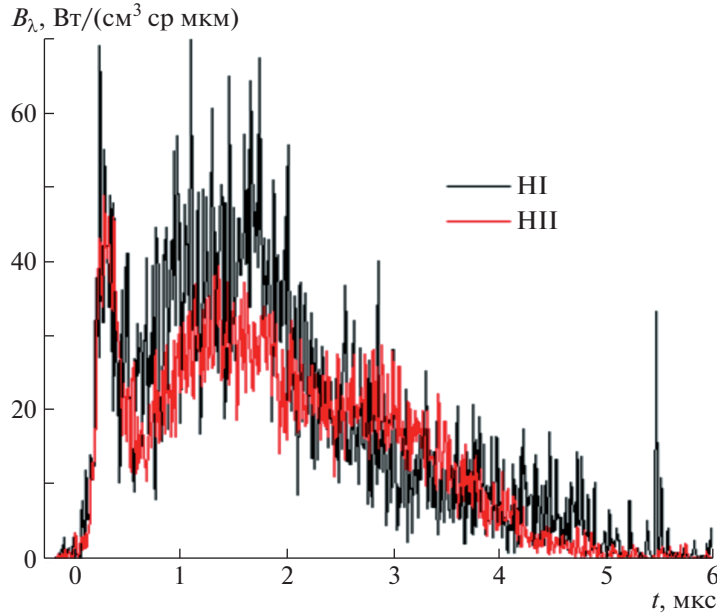
**Рис. 2.** Эволюция интенсивности излучения атома кислорода на длине волны  $\lambda = 777$  нм при  $p_0 = 0.25$  Торр и различных значениях  $V_{SW}$ .

вое излучение, которое включает в себя тормозное и фото-рекомбинационное излучение электронов низкотемпературной плазмы [20]. С другой стороны, из-за наложения как атомных, так и молекулярных эмиссионных линий к анализу UV/VIS области должен применяться иной подход, чем к VIS/IR области, в которой излучение испускается только атомарными частицами [21].

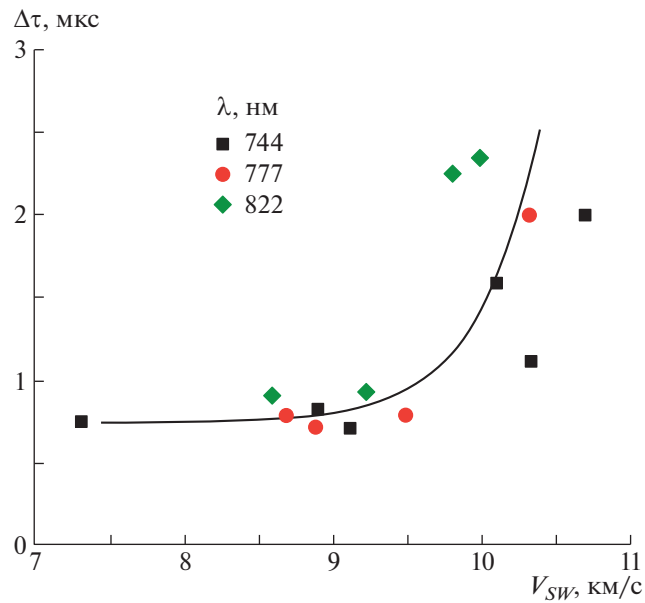
Большую роль в тестировании радиационно-столкновительных моделей, описывающих излучение ударно нагретого воздуха, играют временные характеристики излучения [22]. На рис. 2 показаны временные спектрограммы излучения линии атома кислорода на длине волны  $\lambda = 777$  нм, полученные при  $p_0 = 0.25$  Торр и разных скоростях ударной волны. Видно, что по мере протекания процесса резкий всплеск излучения на начальной стадии, связанный с неравновесностью процесса, сменяется равновесной зоной, которая по протяженности времени процесса значительно превышает неравновесную зону. Максимум интенсивности в неравновесной зоне растет с увеличением  $V_{SW}$ . Одновременно увеличивается интенсивность излучения в равновесной зоне, причем при скоростях ударной волны выше 10.4 км/с интенсивности излучения в неравновесной и равновесной зонах становятся примерно одинаковыми. Это говорит о том, что при больших скоростях ударной волны неравновесные процессы не дают большой вклад в общую интенсивность излучения. Аналогичное поведение временных спектрограмм излучения характерно также для молекулярных полос [13].

На рис. 3 показано изменение интенсивности излучения атома кислорода на длине волны  $\lambda = 822$  нм при  $V_{SW} = 9.8$  км/с. Как и в предыдущем случае, четко фиксируются неравновесная и равновесная зоны излучения. Неравновесная зона представляет собой узкий короткий пик, быстро переходящий в равновесную зону излучения по мере увеличения времени процесса. Равновесная зона характеризуется постепенным нарастанием интенсивности излучения до максимального значения, примерно совпадающего с пиковой интенсивностью неравновесного излучения, с последующим затуханием интенсивности к моменту  $t = 5$  мкс. Данные измерений записаны с помощью измерительных каналов НИ и НИИ, использующих разные спектрографы. Этим объясняются незначительные различия в приведенных спектрограммах.

Временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха, измеренные на определенных длинах волн, позволяют определить эффективное время излучения  $\Delta t$ , которое служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$  на объемную мощность излучения  $B_\lambda$ , обычно измеряемую в единицах Вт/(см<sup>3</sup>·мкм·ср). Процедура вычисления  $\Delta t$  состоит в замене временной осциллограммы излучения, изображенной на рис. 2, на равный ей по площади прямоугольник, высота которого равна максимальному значению мощности излучения на осциллограмме, а ширина принимается равной эффективному времени излучения  $\Delta t$  [16].



**Рис. 3.** Временные зависимости излучения атома кислорода на длине волны  $\lambda = 822$  нм, полученные с помощью измерительных каналов NI и NII при  $p_0 = 0.25$  Торр и  $V_{SW} = 9.8$  км/с.



**Рис. 4.** Зависимость эффективного времени излучения  $\Delta\tau$  атомарных спектральных линий от скорости ударной трубы: точки – экспериментальные данные, линия – аппроксимирующая кривая.

На рис. 4 показана зависимость величины  $\Delta\tau$  от скорости ударной волны  $V_{SW}$  для некоторых атомарных линий азота и кислорода. Анализ рисунка показывает, что эффективное время излучения  $\Delta\tau$  увеличивается с ростом  $V_{SW}$  независимо от длины волны излучения. Аналогичное поведение величины  $\Delta\tau$  наблюдается и для излучения молекулярных полос, характерных для UV/VIS спектрального диапазона [13].

Спектрограмма для объемной мощности излучения  $B_\lambda$  получается из соответствующей спектрограммы для объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$ , если значения последней разделить на эффективное время излучения  $\Delta\tau$ . На рис. 5а показан пример панорамного спектра ударно на-

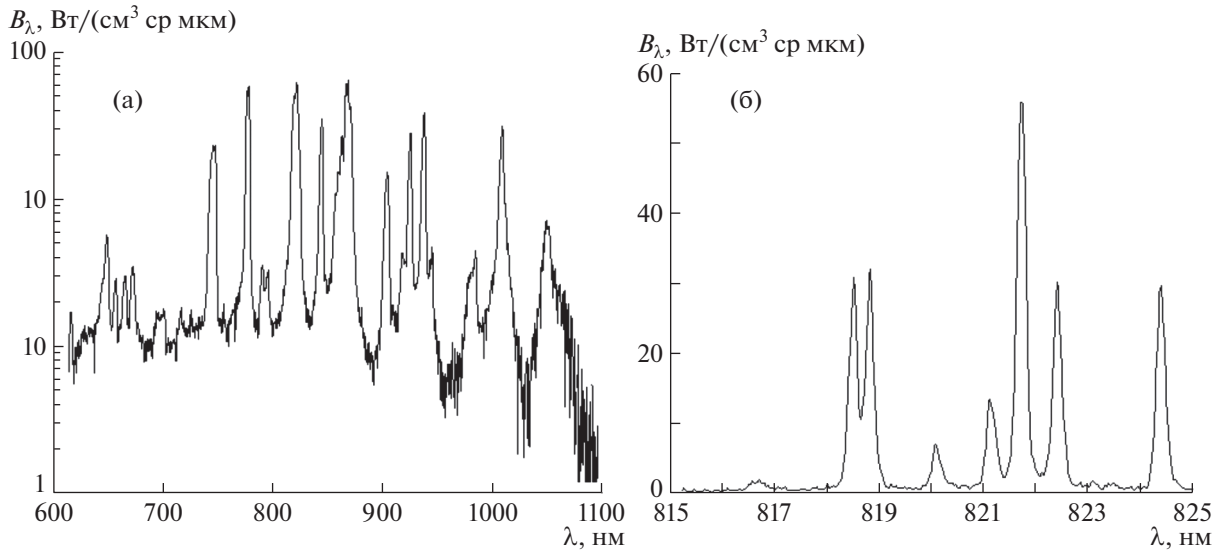


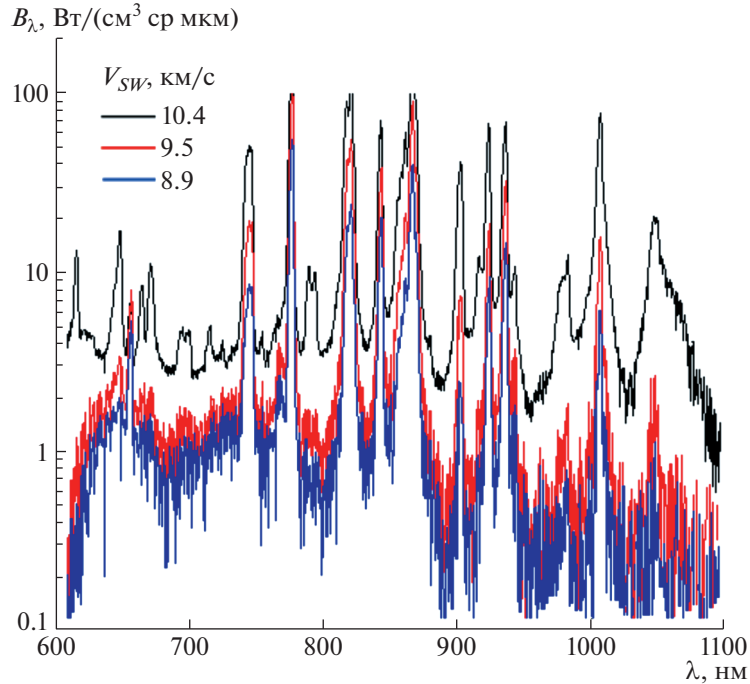
Рис. 5. Объемная мощность излучения ударно нагретого воздуха во всем VIS/IR спектральном диапазоне (а) и на участке  $\lambda = 815\text{--}825$  нм (б) при начальном давлении  $p_0 = 0.25$  Торр и скорости ударной волны  $V_{\text{SW}} = 9.8$  км/с.

гретого воздуха, представленного в виде зависимости величины  $B_\lambda$  от длины волны излучения  $\lambda$ . Подобная процедура полезна при сопоставлении панорамных спектров, полученных в настоящей работе, с данными зарубежных исследований, в которых спектрограммы излучения, как правило, приведены в единицах  $B_\lambda$ . Следует отметить, что эффективные времена излучения  $\Delta t$  для разных спектральных линий при определенном значении скорости ударной волны могут отличаться друг от друга, как это показано на рис. 4. Поэтому использование одного значения величины  $\Delta t$  для всего исследуемого спектрального диапазона может привести к большой погрешности при вычислении мощности излучения  $B_\lambda$ .

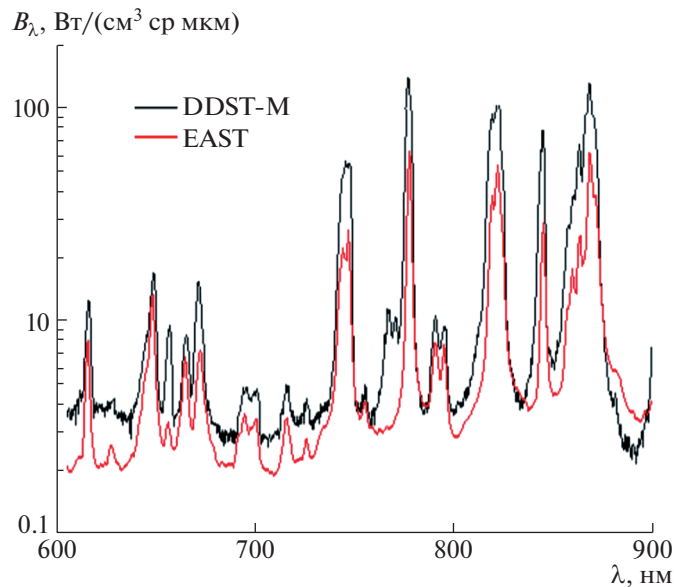
На рис. 5б показан участок панорамного спектра, изображенного на рис. 5а, который соответствует мультиплету атома азота с максимумом интенсивности на длине волны  $\lambda = 821.6$  нм. Видно, что в более высоком разрешении мультиплет, представленный на рис. 5а одним пиком, распадается на серию полос разной интенсивности. Мультиплет описывает переход с уровня  $2s^2 2p^2(^3P)3p$  на уровень  $2s^2 2p^2(^3P)3s$  и состоит из семи полос на длинах волн  $\lambda = 818.5, 818.8, 820.0, 821.1, 821.6, 822.3$  и  $824.2$  нм [17]. Переход от измеренных значений объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$  к объемной мощности излучения  $B_\lambda$  проведен при значении  $\Delta t = 2.3$  мкс для данной длины волны излучения, которое получено на основании обработки временной спектрограммы, приведенной на рис. 3.

Зависимость объемной мощности излучения  $B_\lambda$  ударно нагретого воздуха от скорости ударной волны в VIS/IR спектральном диапазоне при начальном давлении газа перед ударной волной  $p_0 = 0.25$  Торр показана на рис. 6. Видно, что максимум интенсивности излучения практически всех наблюдаемых атомарных линий увеличивается примерно в четыре раза при изменении  $V_{\text{SW}}$  от 8.9 до 10.4 км/с. Это связано, в первую очередь, с увеличением интенсивности ударной волны при увеличении ее скорости и, соответственно, с ростом температуры газа за ударной волной. Более высокая температура газа в свою очередь увеличивает степень диссоциации молекул газа, а также повышает заселенность возбужденных уровней образующихся атомов. Для определения эффективных времен излучения  $\Delta t$  при пересчете измеренных значений объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$  на объемную мощность излучения  $B_\lambda$  использовалась аппроксимирующая кривая, приведенная на рис. 4.

Измеренные спектрограммы излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR спектральной области достаточно хорошо согласуются с результатами соответствующих измерений, полученных на зарубежных установках. К ним в первую очередь относится электроразрядная установка EAST, эксплуатируемая в Исследовательском центре NASA Ames (США), где проведено большое количество измерений радиационных характеристик высокотемпературного воздуха в различных спектральных диапазонах [23]. На рис. 7 проводится сравнение панорамных спектров излучения



**Рис. 6.** Объемная мощность излучения ударно нагретого воздуха при начальном давлении  $p_0 = 0.25$  Торр и различных скоростях ударной волны.



**Рис. 7.** Сравнение объемных мощностей излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR спектральной области, полученных на ударной трубе DDST-M при  $p_0 = 0.25$  Торр и  $V_{SW} = 10.1$  км/с и ударной установке EAST при  $p_0 = 0.2$  Торр и  $V_{SW} = 10.3$  км/с [23].

в VIS/IR спектральной области, полученных на ударных установках DDST-M и EAST примерно в одинаковых условиях. Видно, что обе спектральные кривые в общих чертах повторяют друг друга. Данные настоящей работы лежат несколько выше результатов измерений на EAST, что можно объяснить более высоким давлением в экспериментах на DDST-M. Следует также отметить, что в экспериментах на установке EAST, как правило, фиксируется излучение из равновес-

ной зоны ударной волны, где интенсивность излучения практически не меняется [24]. В экспериментах на DDST-M CCD приемник суммирует излучение на каждой длине волны из всей излучающей зоны (неравновесной и равновесной).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных измерений спектральных характеристик ударно нагретого воздуха в видимой и ближней инфракрасной областях спектра при скоростях ударной волны до 11.4 км/с показывают, в данном спектральном диапазоне регистрируется в основном излучение атомарных линий азота и кислорода. Интенсивность излучения растет с увеличением скорости ударной волны.

Временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха, измеренные на определенных длинах волн, играют большую роль в тестировании радиационно-столкновительных моделей. Они позволяют также определить эффективное время излучения  $\Delta t$ , которое служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$  на объемную мощность излучения  $B_\lambda$ .

Измеренные панорамные спектры излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR спектральной области достаточно хорошо согласуются с результатами соответствующих измерений, полученных на зарубежных установках и, в частности, на электроразрядной установке EAST, эксплуатируемой в Исследовательском центре NASA Ames (США).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wessen R.R., Propster P., Cable M. et al.* Developing compelling and science-focused mission concepts for NASA competed mission proposals // *Acta Astronaut.* 2022. V. 191. P. 502–509.
2. *Leitner J., Hyde T.* Modernizing NASA's risk classification system // *Acta Astronaut.* 2023. V. 202. P. 333–340.
3. *Суржиков С.Т., Яцухно Д.С.* // Анализ летных данных по конвективному и радиационному нагреву поверхности спускаемого марсианского космического аппарата SCHIAPARELLI // *Изв. РАН. МЖГ.* 2022. № 6. С. 73–84.
4. *Суржиков С.Т.* Пространственная задача радиационной газовой динамики командного модуля Апполон-4 при сверхорбитальном входе в атмосферу // *Изв. РАН. МЖГ.* 2018. № 2. С. 149–160.
5. *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.
6. *Колесников А.Ф., Васильевский С.А., Щелоков С.Л., Чаплыгин А.В., Галкин С.С.* Анализ возможностей локального моделирования аэродинамического нагрева в мощном ВЧ-плазматроне ВГУ-3 // *Изв. РАН. МЖГ.* 2022. № 6. С. 116–124.
7. *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.
8. *Brandis A.M., Johnson C.O., Cruden B.A.* Investigation of non-equilibrium radiation for Earth entry // *AIAA Paper* 2016–3690. 19 p.
9. *Kozlov P.V., Surzhikov S.T.* Nonequilibrium radiation NO in shocked air // *AIAA Paper* 2017–0157. 16 p.
10. *Gu S., Olivier H.* Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities // *Prog. Aerospace Sci.* 2020. V. 113. № 100607. 27 p.
11. *Герасимов Г.Я., Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Левашов В.Ю.* Исследование радиационных характеристик высокотемпературных газов, проведенное в ударных трубах // *Химическая физика.* 2022. Т. 41. № 8. С. 17–30.
12. *Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Козлов П.В., Стывбун С.В., Тереза А.М., Шаталов О.П.* Радиационные характеристики воздуха в ультрафиолетовой и вакуумно ультрафиолетовой областях спектра за фронтом сильных ударных волн // *Химическая физика.* 2018. Т. 37. № 2. С. 35–41.
13. *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.
14. *Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Tunik Yu.V.* Experimental study of air radiation behind a strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2022. V. 194. P. 461–467.
15. *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.



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. NIST Atomic Spectra Database, Version 5.10. Gaithersburg: NIST, 2022. <https://doi.org/10.18434/T4W30F>
18. Kazakov V.V., Kazakov V.G., Kovalev V.S., Meshkov O.I., Yatsenko A.S. Electronic structure of atoms: atomic spectroscopy information system // Phys. Scr. 2017. V. 92. № 105002. 6 p.
19. 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. V. 29. P. 209–221.
20. Jung Y.-D., Kim C.-G. Classical bremsstrahlung radiation from electron–ion encounters in a nonideal plasma // J. Plasma Phys. 2022. V. 67. P. 191–197.
21. Lemal A., Jacobs C.M., Perrin M.-Y., Laux C.O., Tran P., Raynaud E. Prediction of nonequilibrium air plasma radiation behind a shock wave // J. Thermophys. Heat Trans. 2016. V. 30. P. 197–210.
22. Суржиков С.Т. Расчет неравновесного излучения ударных волн в воздухе с использованием двух моделей // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 99–114.
23. Brandis A.M., Cruden B.A. Benchmark shock tube experiments of radiative heating relevant to earth re-entry // AIAA Paper. 2017. № 2017–1145.
24. Parker R., Dufrene A., Holden M., Wakeman T. Shock-front emission measurements at 10 km/s // AIAA Paper 2011–715. 11 p.