

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^а, И. Е. Забелинский^а, Н. Г. Быкова^а,
Г. Я. Герасимов^а, В. Ю. Левашов^{а,*,**}

^аИнститут 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 HI и HII 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_λ , измеряемой в Дж/(м³·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_λ к объемной мощности излучения B_λ , измеряемой в единицах Вт/(см³·мкм·ср), необходимо разделить объемную плотность на эффективное время излучения Δt (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_λ 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(β , γ , δ), N₂(2+), N₂⁺(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.

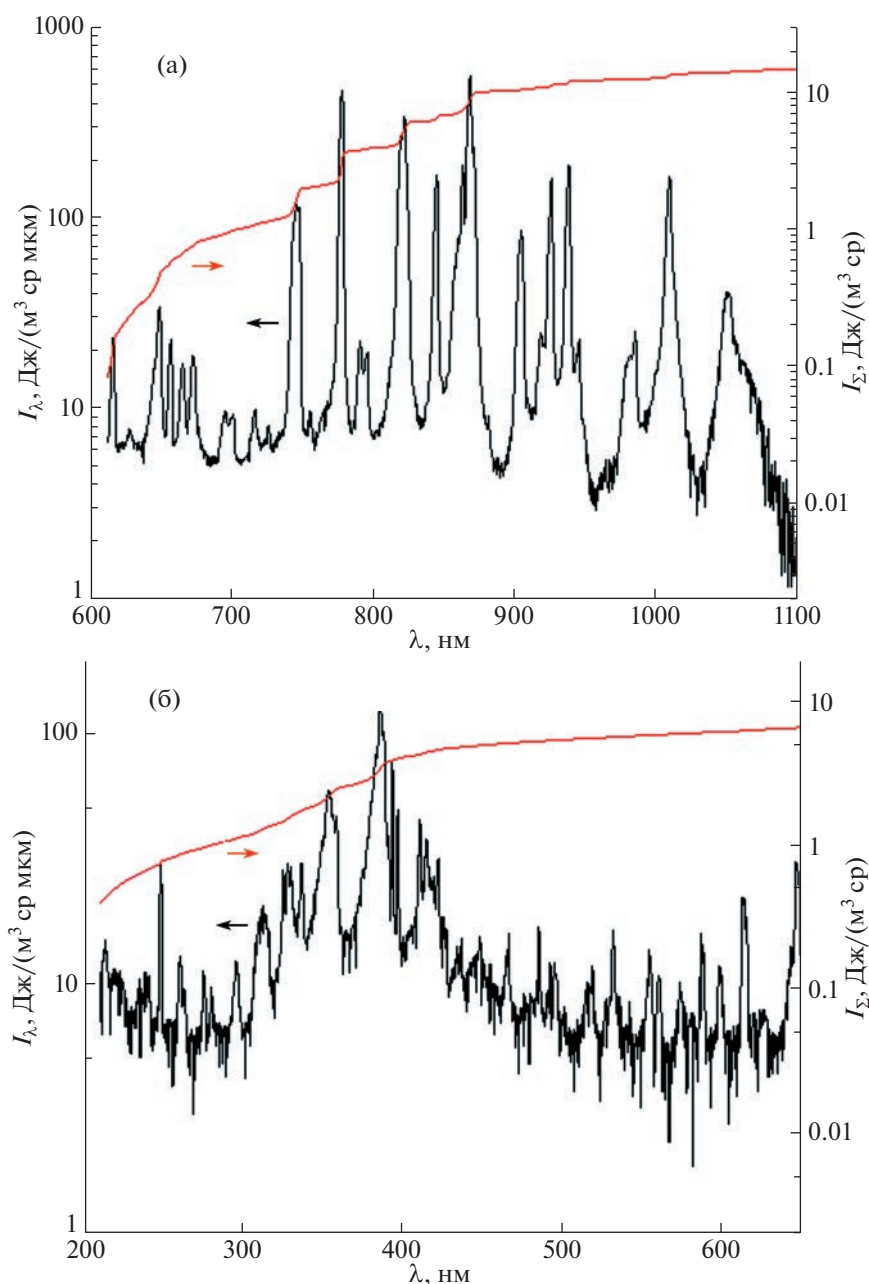


Рис. 1. Спектральная I_λ и суммарная I_Σ плотность излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR (а) и UV/VIS (б) спектральных диапазонах при начальном давлении $p_0 = 0.25$ Торр и скорости ударной волны $V_{\text{SW}} = 10.5$ км/с.

Причины появления атомарных линий углерода и водорода в спектре излучения ударно нагретого воздуха связаны с присутствием в окружающем воздухе CO_2 , паров воды и углеродсодержащих примесей, для удаления которых требуются дополнительные меры.

На рис. 1 приведена также суммарная плотность излучения I_Σ 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-

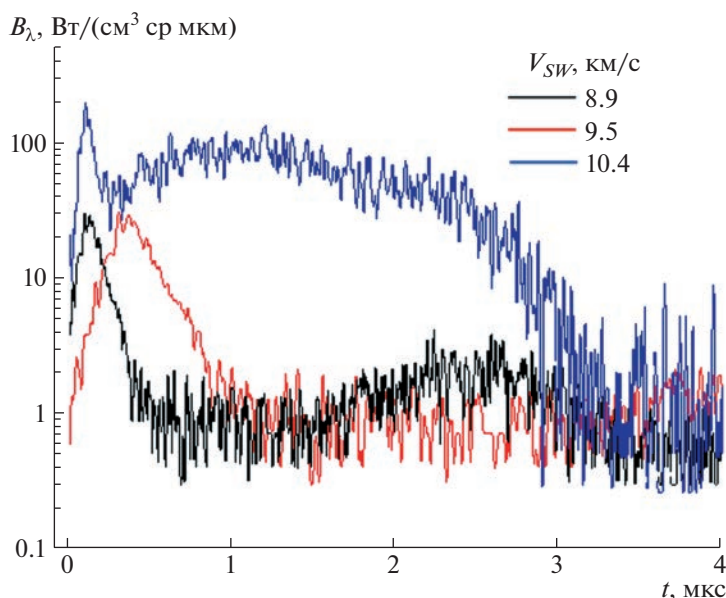


Рис. 2. Эволюция интенсивности излучения атома кислорода на длине волны $\lambda = 777$ нм при $p_0 = 0.25$ Торр и различных значениях V_{SW} .

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 НІ и НІІ, 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 Δt , которое служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения I_λ на объемную мощность излучения B_λ , обычно измеряемую в единицах Вт/(см³·мкм·ср). Процедура вычисления Δt 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 Δt [16].

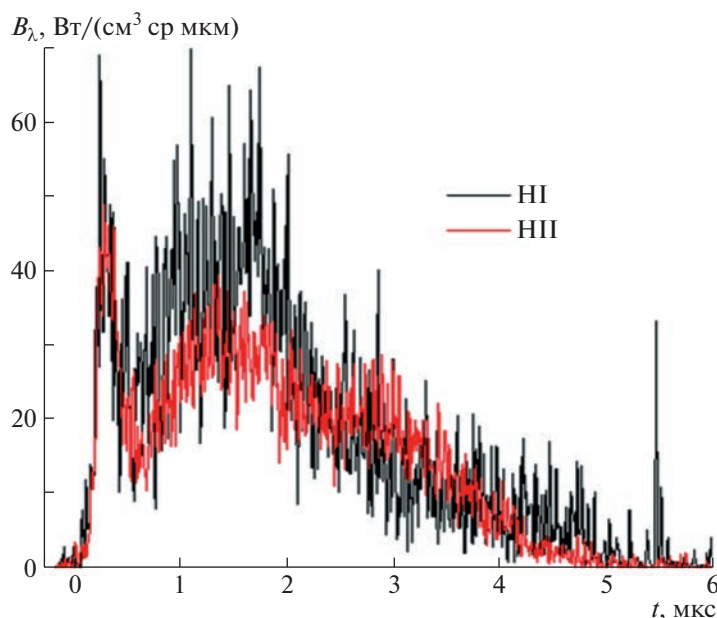


Рис. 3. Временные зависимости излучения атома кислорода на длине волны $\lambda = 822$ нм, полученные с помощью измерительных каналов НІ и НІІ при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 9.8$ км/с.

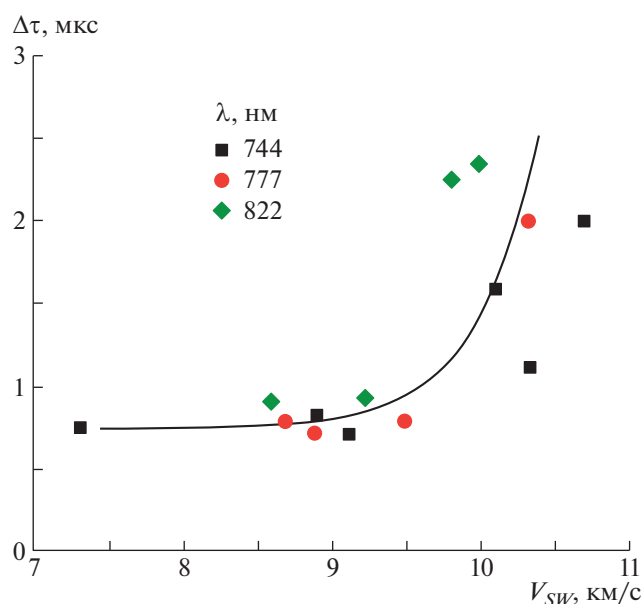


Рис. 4. Зависимость эффективного времени излучения $\Delta\tau$ атомарных спектральных линий от скорости ударной трубы: точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимирующая кривая.

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

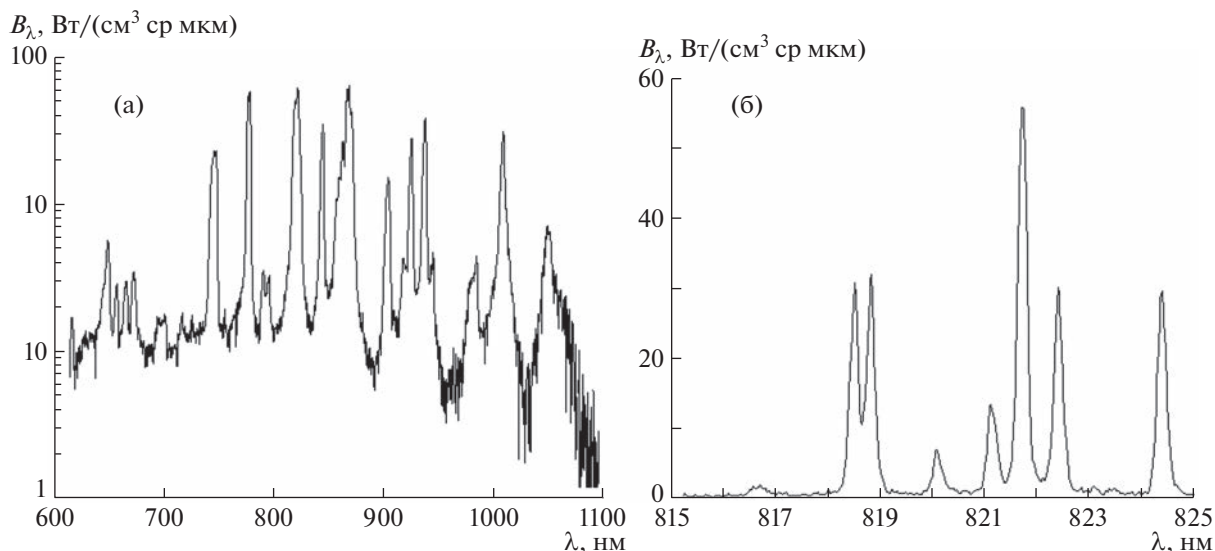


Рис. 5. Объемная мощность излучения ударно нагретого воздуха во всем VIS/IR спектральном диапазоне (а) и на участке $\lambda = 815\text{--}825$ нм (б) при начальном давлении $p_0 = 0.25$ Торр и скорости ударной волны $V_{SW} = 9.8$ км/с.

гретого воздуха, представленного в виде зависимости величины B_λ от длины волны излучения λ . 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_λ . Следует отметить, что эффективные времена излучения Δt 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 Δt для всего исследуемого спектрального диапазона может привести к большой погрешности при вычислении мощности излучения B_λ .

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_λ к объемной мощности излучения B_λ 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_λ 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_{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 Δt при пересчете измеренных значений объемной плотности энергии излучения I_λ на объемную мощность излучения B_λ 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

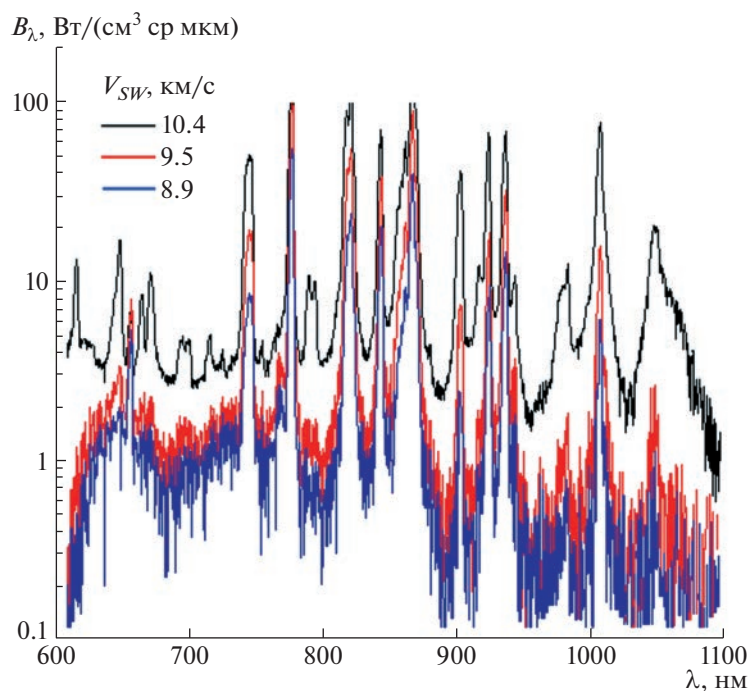


Рис. 6. Объемная мощность излучения ударно нагретого воздуха при начальном давлении $p_0 = 0.25$ Торр и различных скоростях ударной волны.

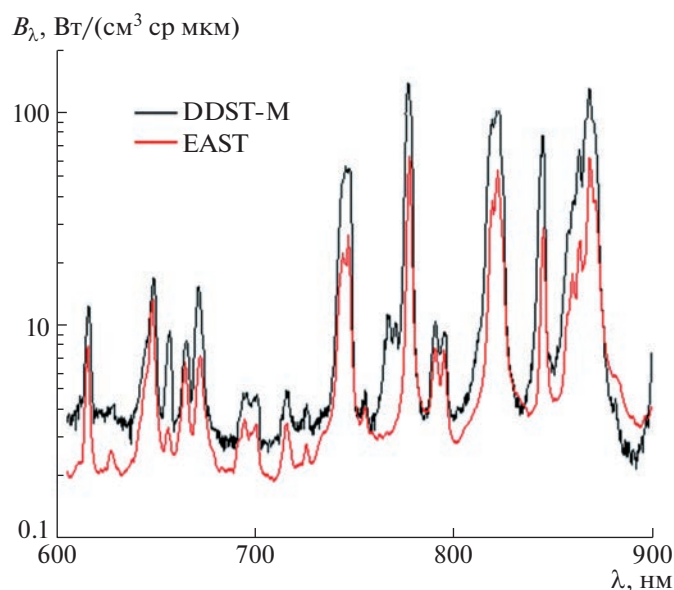


Рис. 7. Сравнение объемных мощностей излучения ударно нагретого воздуха в VIS/IR спектральной области, полученных на ударной трубе DDST-M при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 10.1$ км/с и ударной установке EAST при $p_0 = 0.2$ Торр и $V_{SW} = 10.3$ км/с [23].

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 Δt , которое служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения I_λ на объемную мощность излучения B_λ .

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., Стовбун 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.