

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО-НАГРЕТОГО КИСЛОРОДА**И. Е. Забелинский, Н. Г. Быкова, П. В. Козлов,
В. Ю. Левашов*, Г. Я. Герасимов**

УДК 543.42:533.1

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-1-64-68>*Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
e-mail: vyl69@mail.ru, levashovy@imec.msu.ru**(Поступила 19 ноября 2021)*

Исследованы спектры излучения кислорода за фронтом сильной ударной волны в диапазонах скоростей ударной волны 5.7—7.4 и 8.1—10.0 км/с при давлениях перед фронтом волны 1.0 и 0.25 Торр. Получены интегральные по времени развертки излучения в широком диапазоне спектра 200—675 нм, а также временные осциллограммы излучения кислорода. Анализ полученных панорамных спектров показывает, что при низких скоростях ударной волны в спектре излучения доминирует система молекулярных полос Шумана—Рунге. Повышение скорости ударной волны ведет к появлению в спектре излучения интенсивных атомных линий. Выделены особенности временных осциллограмм для наиболее типичных линий спектра — излучения молекулярного кислорода на длине волны 213 нм (система Шумана—Рунге) и атомарного кислорода на длинах волн 394 и 645 нм.

Ключевые слова: ударная волна, кислород, спектр излучения.

The emission spectra of oxygen behind the front of a strong shock wave have been studied in the shock wave velocity ranges of 5.7—7.4 and 8.1—10.0 km/s at pressures before the wave front of 1.0 and 0.25 Torr. Time-integrated sweeps of radiation in a wide spectral range of 200—675 nm as well as temporal oscillograms of oxygen radiation have been obtained. An analysis of the obtained panoramic spectra shows that at low velocities of the shock wave, the system of Schumann—Runge molecular bands dominates in the emission spectrum. An increase in the shock wave velocity leads to the appearance of intense atomic lines in the emission spectrum. The peculiarities of temporal oscillograms for the most typical spectral lines, such as radiation of molecular oxygen at a wavelength of 213 nm (Schumann—Runge system) and radiation of atomic oxygen at wavelengths of 394 and 645 nm, are highlighted.

Keywords: shock wave, oxygen, radiation spectrum.

Введение. Исследование радиационных характеристик ударно-нагретых газовых смесей, моделирующих условия входа возвращаемых космических аппаратов в атмосферу Земли со сверхорбитальными скоростями, вызывает в последнее время повышенный интерес в связи с планируемыми полетами к Луне и Марсу [1]. Оценка вклада неравновесного излучения, испускаемого из сильно нагретой области за ударной волной, в общий тепловой поток к поверхности спускаемого аппарата является важным условием по обеспечению надежной термической защиты космического корабля [2].

Основным инструментом для изучения физико-химических процессов, связанных с излучением ударно-нагретых газов, служат ударные трубы [3]. Результаты численной обработки экспериментальных данных, полученных на ударных трубах, представляют существенный интерес как для аэрокосмических приложений, так и для фундаментальных исследований. Ввод в эксплуатацию новых ударных установок и усовершенствование измерительной аппаратуры позволяют получать более точные и детальные данные об излучательных характеристиках высокотемпературных газов по сравнению с экспериментальными данными, полученными ранее [4, 5].

RADIATIVE CHARACTERISTICS OF SHOCK HEATED OXYGEN**I. E. Zabelinsky, N. G. Bikova, P. V. Kozlov, V. Yu. Levashov*, G. Ya. Gerasimov** (*Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow; e-mail: vyl69@mail.ru, levashovy@imec.msu.ru*)

Неравновесные термохимические процессы в кислороде изучаются в основном с использованием диагностики поглощения излучения от внешнего источника ударно-нагретым газом [6—10]. Для многих практических приложений необходима экспериментальная информация об излучении неравновесного высокотемпературного газа в большом спектральном диапазоне. Применительно к излучению ударно-нагретого кислорода такая информация практически отсутствует. В настоящей работе получены новые экспериментальные результаты по спектрам излучения кислорода в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Работа является продолжением цикла исследований неравновесного излучения воздуха и его составляющих за сильной ударной волной применительно к орбитальным и сверхорбитальным скоростям входа космических аппаратов в плотные слои атмосферы Земли [11—13].

Эксперимент. Исследование излучения ударно-нагретого кислорода осуществлялось на модернизированной двухдиафрагменной ударной трубе (DDST-M) Института механики МГУ им. М. В. Ломоносова, принцип действия которой основан на детонационном сжигании стехиометрической смеси кислорода с водородом в камере высокого давления (КВД). Модернизация заключается во включении в конструкцию исходной двухдиафрагменной ударной трубы (DDST), на которой ранее была проведена серия экспериментов по определению характеристик излучения различных ударно-нагретых газов, дополнительного элемента — форкамеры. Форкамера отделяет торцевую стенку трубы, на которой расположено поджигающее устройство, от основного объема КВД перфорированным диском. Наличие форкамеры увеличивает энергоэффективность установки в первую очередь за счет более полного сгорания горючей смеси в КВД, что позволяет при прочих равных условиях получать в камере низкого давления (КНД) более высокие скорости ударных волн.

Ударная труба имеет внутренний диаметр 50 мм и оборудована двумя измерительными секциями, что позволяет в одном эксперименте определять временное и спектральное распределение излучения газа за фронтом ударной волны. Подробное описание основных технических параметров систем регистрации излучения приведено в [14]. Для измерения абсолютных интенсивностей излучения системы регистрации калибровались путем стандартной процедуры сравнения с излучением известных эталонных источников.

Результаты и их обсуждение. Получены данные по излучению кислорода за фронтом падающей ударной волны в диапазоне скоростей ударной волны $V_{SH} = 5.7—7.8$ км/с при давлении газа перед фронтом ударной волны $p_0 = 1.0$ Торр и $V_{SH} = 8.1—10.0$ км/с при $p_0 = 0.25$ Торр. На рис. 1 приведены интегральные по времени панорамные спектры в интервале $\lambda = 200—675$ нм (УФ- и видимый диапазоны). Панорамные спектры дают представление об интенсивности излучения ударно-нагретого газа в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа, позволяют определить состав спектра и являются основой как для оценки радиационного нагрева поверхности спускаемых космических аппаратов, так и для тестирования разрабатываемых радиационно-столкновительных моделей излучающего газа.

Молекулярный кислород в отличие от одноатомных газов, например аргона, имеет внутренние степени свободы (вращательные и колебательные), что усложняет общую картину переходов между различными электронными состояниями. Электронные переходы в молекуле O_2 между основным электронным состоянием $X^3\Sigma_g^-$ и низколежащими состояниями $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$, а также состояниями Герцберга $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ — запрещенные по спину либо по орбитальной симметрии [15]. Из этого следует, что в УФ и видимом диапазонах спектра кислород оптически малоактивен.

Доминирующей в спектре излучения молекулярного кислорода является система Шумана—Рунге, которая описывается электронным переходом $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$. Как видно из рис. 1, *а*, дискретные полосы этого перехода наблюдаются в области $\lambda = 200—400$ 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, что молекулы кислорода не успевают полностью диссоциировать за время наблюдения. С увеличением скорости ударной волны и, соответственно, 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 КНД $p_0 = 1$ Торр.

Дальнейшее повышение V_{SW} , реализуемое на ударной трубе DDST-M лишь при уменьшении p_0 , ведет к появлению в спектре излучения кислорода интенсивных атомных линий. На рис. 1, *б* 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

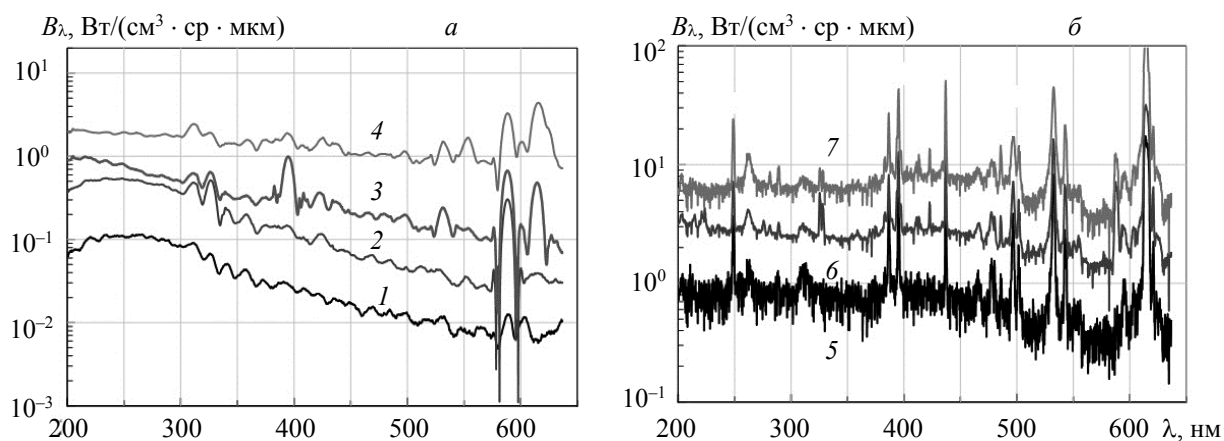


Рис. 1. Панорамные спектры излучения ударно-нагретого кислорода при $p_0 = 1.0$ (а) и 0.25 Торр (б): а — $V_{sw} = 5.68$ (1), 6.14 (2), 7.14 (3) и 7.35 км/с (4); б — $V_{sw} = 8.06$ (5), 8.77 (6) и 10.00 км/с (7)

на $\lambda = 297, 382, 394, 423, 436, 496, 532, 615$ и 645 нм. Переходы из возбужденных состояний атома О в основное являются, как правило, коротковолновыми и лежат в области вакуумного ультрафиолета [16]. В спектрах также идентифицируются атомарные линии углерода ($\lambda = 193$ и 247 нм) и линии атома водорода H_α и H_β серии Бальмера ($\lambda = 656$ и 486 нм). Причины появления этих линий связаны с присутствием углеродсодержащих примесей и водяных паров в исследуемом газе, которые конденсируются на стенках ударной трубы в процессе предыдущих экспериментов и довольно сложно поддаются откачке. Подобные проблемы существуют и на других ударных установках, в частности на электроразрядной трубке EAST [17]. Присутствие в спектрах линий Na 589 нм, Cu 327 нм и ионов Ca^+ 393 нм, возможно, связано с люминесценцией кварцевого стекла окон наблюдения под действием излучения из области вакуумного ультрафиолета.

На рис. 2 приведены временные зависимости интенсивности излучения I линии молекулярного кислорода на $\lambda = 213$ нм, типичной в системе полос Шумана—Рунге. Подобные 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 [18]. Видно, что с увеличением скорости ударной волны интенсивность излучения возрастает, особенно в неравновесной зоне, которая характеризуется резким всплеском излучения и находится в рамках временного интервала 0—0.5 мкс. Выход интенсивности излучения на равновесное значение наблюдается лишь при $V_{sw} \leq 6.67$ км/с (рис. 2, а). При более вы-

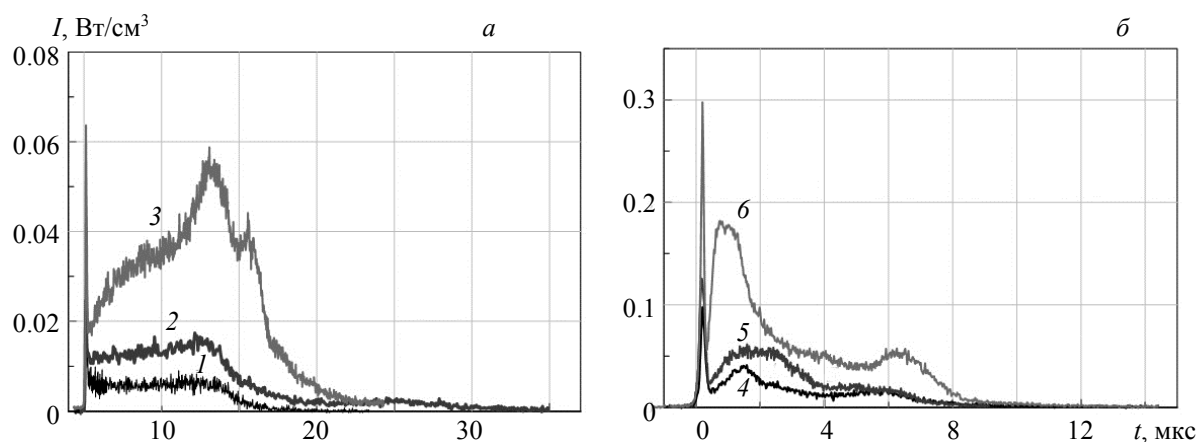


Рис. 2. Временные осциллограммы излучения линии $\lambda = 213$ нм молекулы кислорода при $p_0 = 1.0$ (а) и 0.25 Торр (б): а — $V_{sw} = 6.10$ (1), 6.67 (2) и 7.50 км/с (3); б — $V_{sw} = 8.06$ (4), 8.77 (5) и 10.00 км/с (6)

соких V_{SW} равновесная зона излучения вообще отсутствует, что свидетельствует о неравновесном характере переходов в системе полос Шумана—Рунге при $V_{SW} \geq 7.50$ км/с. При этом временные осциллограммы излучения имеют несколько максимумов (рис. 2, б), что можно объяснить включением различных газовых компонентов (молекул, атомов, ионов и электронов) в процесс возбуждения электронного состояния $B^3\Sigma_u^-$ молекулы кислорода с последующим излучательным переходом $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$.

Несколько иная картина наблюдается для временных зависимостей интенсивности излучения атомарных линий кислорода. На рис. 3 приведены осциллограммы линий излучения атома кислорода $\lambda = 394$ и 645 нм, которые описывают переходы $2s^2 2p^3(^4S^0) 4p5P \rightarrow 2s^2 2p^3(^4S^0) 3s5S^0$ и $2s^2 2p^3(^4S^0) 5s5S^0 \rightarrow 2s^2 2p^3(^4S^0) 3p5P$. Для сравнения показаны осциллограммы линии $\lambda = 213$ нм молекулярного кислорода, измеренные при тех же скоростях ударной волны и начальном давлении. Видно, что в атомарных линиях отсутствует первоначальная сильно неравновесная зона, характерная для системы полос Шумана—Рунге молекулярного кислорода. Это связано, по-видимому, с низкими концентрациями атомов кислорода на начальном этапе процесса, когда степень диссоциации молекул O_2 далека от равновесной. Дальнейшее поведение интенсивностей излучения атомов кислорода повторяет в общих чертах временные осциллограммы линии $\lambda = 213$ нм молекулярного кислорода, что свидетельствует о подобии элементарных процессов, связанных с возбуждением и дезактивацией электронно-возбужденных состояний атомов и молекул в ударно-нагретом газе.

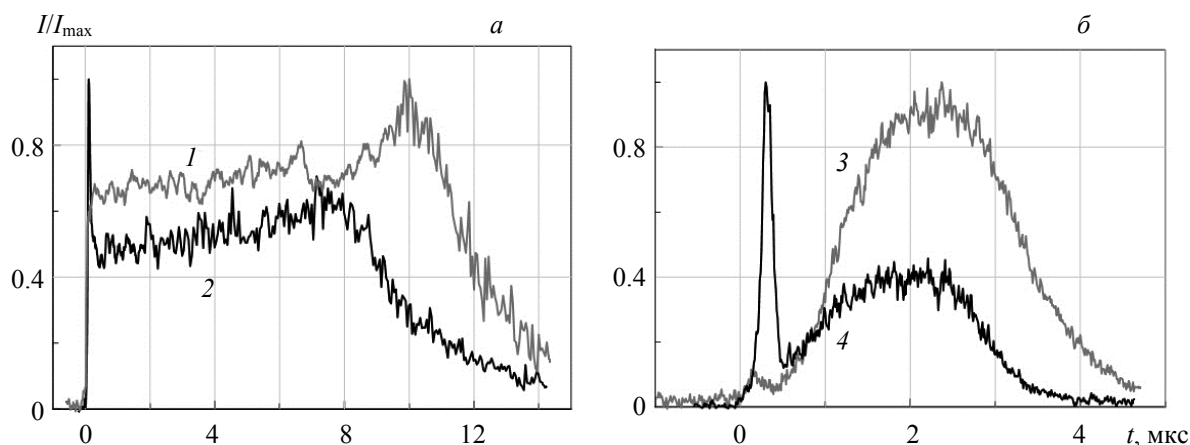


Рис. 3. Временные осциллограммы линий излучения $\lambda = 394$ и 645 нм атома кислорода и линии $\lambda = 213$ нм молекулы кислорода: а — $\lambda = 394$ (1) и 213 нм (2) при $p_0 = 1.0$ Торр и $V_{SW} = 6.67$ км/с; б — $\lambda = 645$ (3) и 213 нм (4) при $p_0 = 0.25$ Торр и $V_{SW} = 8.77$ км/с

Заключение. Представлены панорамный спектр и временные осциллограммы излучения ударно-нагретого кислорода при различных скоростях ударных волн V_{SW} и начальных давлениях газа p_0 . Показано, что доминирующей в спектре излучения является система полос Шумана—Рунге. С увеличением V_{SW} интенсивность излучения возрастает, особенно в неравновесной зоне. Выход интенсивности излучения на равновесное значение происходит лишь при $V_{SW} \leq 6.67$ км/с. При более высоких V_{SW} равновесная зона излучения не наблюдается, что свидетельствует о неравновесном характере переходов в системе полос Шумана—Рунге при скоростях ударной волны $V_{SW} \geq 7.50$ км/с. В атомарных линиях кислорода отсутствует первоначальная сильно неравновесная зона, характерная для системы полос Шумана—Рунге. Это можно объяснить низкими концентрациями атомов кислорода на начальном этапе процесса, когда степень диссоциации молекул O_2 далека от равновесной. Полученные данные являются основой как для оценки радиационного нагрева поверхности спускаемых космических аппаратов, так и для тестирования разрабатываемых радиационно-столкновительных моделей излучающего газа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00343).

-
- [1] **G. V. Candler.** *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **51** (2019) 379—402
- [2] **O. Uyanna, H. Najafi.** *Acta Astronaut.*, **176** (2020) 341—356
- [3] **S. Gu, H. Olivier.** *Prog. Aerospace Sci.*, **113**, N 100607 (2020) 1—27
- [4] **P. L. Collen, L. J. Doherty, M. McGilvray, I. Naved, R. P. Geraets, T. Hermann, R. G. Morgan, D. E. Gildfind.** *AIAA Paper*, N 1941 (2019) 1—14
- [5] **M. Lino da Silva, R. Ferreira, J. Vargas, R. Rodrigues, B. Carvalho, L. L. Alves, B. Goccalves.** *AIAA Paper*, N 0624 (2020) 1—11
- [6] **И. Е. Забелинский, Л. Б. Ибрагимова, О. П. Шаталов.** *Журн. прикл. спектр.*, **73**, № 1 (2006) 13—17 [**I. E. Zabelinskii, L. B. Ibragimova, O. P. Shatalov.** *J. Appl. Spectr.*, **73**, N 1 (2006) 10—15]
- [7] **L. B. Ibragimova, A. L. Sergievskaya, V. Yu. Levashov, O. P. Shatalov, Yu. V. Tunik, I. E. Zabelinskii.** *J. Chem. Phys.*, **139**, N 034317 (2013) 1—10
- [8] **Z. Qin, J. M. Zhao, L. H. Liu.** *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **202**, N 1 (2017) 286—301
- [9] **K. M. Hanquist, I. D. Boyd.** *AIAA Paper*, N 3567 (2019) 1—25
- [10] **J. W. Streicher, A. Krish, R. K. Hanson.** *Phys. Fluids*, **32**, N 076103 (2020) 1—22
- [11] **A. S. Dikalyuk, S. T. Surzhikov, P. V. Kozlov, O. P. Shatalov, Yu. V. Romanenko.** *AIAA Paper*, N 2505 (2013) 1—27
- [12] **P. V. Kozlov, S. T. Surzhikov.** *AIAA Paper*, N 0157 (2017) 1—26
- [13] **P. V. Kozlov.** *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1009**, N 012024 (2018) 1—6
- [14] **П. В. Козлов, И. Е. Забелинский, Н. Г. Быкова, В. Ю. Левашов, Г. Я. Герасимов.** *Журн. прикл. спектр.*, **88**, № 2 (2021) 244—248 [**P. V. Kozlov, I. E. Zabelinskii, N. G. Bykova, V. Yu. Levashov, G. Ya. Gerasimov.** *J. Appl. Spectr.*, **88**, N 2 (2021) 306—310]
- [15] **D. H. Parker.** *Acc. Chem. Res.*, **33**, N 8 (2000) 563—571
- [16] **M. Nations, S. Wang, C. S. Goldenstein, D. F. Davidson, R. R. Hanson.** *J. Phys. Chem. A*, **120**, N 42 (2016) 8234—8243
- [17] **C. O. Johnson.** *AIAA Paper*, N 1245 (2008) 1—19
- [18] **С. Т. Суржиков.** *Изв. РАН. МЖГ*, № 1 (2019) 169—182 [**S. T. Surzhikov.** *Fluid Dynam.*, **54**, N 1 (2019) 98—113]