

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АРГОНА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

П. В. Козлов, И. Е. Забелинский, Н. Г. Быкова,  
В. Ю. Левашов\*, Г. Я. Герасимов

УДК 543.42:533.1

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова,  
119192, Москва, Россия; e-mail: vyl69@mail.ru, levashovvy@imec.msu.ru

(Поступила 29 декабря 2020)

Исследованы спектры излучения аргона за фронтом сильной ударной волны в диапазоне скоростей ударной волны 4.6–8.3 км/с и давлений перед фронтом волны 0.25–5.00 Торр. Получены интегральные по времени развертки излучения в широком диапазоне спектра от ультрафиолетового до инфракрасного (190–1100 нм), а также временные зависимости интенсивности излучения аргона на длинах волн 420, 532.8 и 740 нм. Выделены три характерных этапа временной эволюции излучения линий. Установлена зависимость длительности излучения линий и его интенсивности от начального давления газа и скорости ударной волны. Получены данные по интенсивности фонового излучения, которые можно использовать для выделения интенсивности определенных линий атома аргона из суммарного излучения.

**Ключевые слова:** ударная волна, эксперимент, аргон, спектр излучения.

*The emission spectra of argon behind the front of a strong shock wave are studied in the range of shock wave velocities of 4.6–8.3 km/s and pressures before a wave front of 0.25–5.00 Torr are presented. Time-integrated sweeps of radiation in a wide spectral range from ultraviolet to infrared (190–1100 nm) as well as time dependences of the intensity of argon radiation at wavelengths of 420, 532.8, and 740 nm are obtained. Three characteristic stages of temporal evolution of line emission are defined. The dependence of the duration of the emission of lines and its intensity on the initial pressure of gas and velocity of shock wave is established. Data are obtained on intensity of background radiation, which can be used to separate intensity of certain lines of argon atom from the total radiation.*

**Keywords:** shock wave, experiment, argon, radiation spectrum.

**Введение.** Экспериментальные работы по измерению абсолютных значений спектральной интенсивности излучения в низкотемпературной плазме, образующейся за фронтом сильной ударной волны, представляют большой интерес для гиперзвуковой аэродинамики. В первую очередь это относится к пилотируемым спускаемым аппаратам, возвращаемым на Землю с орбитальными и особенно сверхорбитальными скоростями, когда радиационный нагрев поверхности аппарата становится основным [1].

Удобным объектом для тестирования различных моделей излучения ударно-нагретых газов является аргоновая низкотемпературная плазма [2, 3]. С одной стороны, аргон в качестве примеси входит в состав атмосферного воздуха, с другой — 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 [4].

Исследование радиационных характеристик аргоновой плазмы проводилось в основном применительно к газоразрядной и лазерно-индуцированной плазме [5–8]. В настоящей работе представле-

---

## EXPERIMENTAL STUDY OF GAS RADIATION BEHIND THE FRONT OF A STRONG SHOCK WAVE ARGON

P. V. Kozlov, I. E. Zabelinsky, N. G. Bikova, V. Yu. Levashov\*, G. Ya. Gerasimov (Institute of Mechanics of the M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia; e-mail: vyl69@mail.ru, levashovvy@imec.msu.ru)

ны экспериментальные данные по излучению аргоновой плазмы непосредственно за фронтом сильной ударной волны, распространяющейся по каналу ударной трубы.

**Эксперимент.** Исследование интенсивности излучения аргона за фронтом сильной ударной волны осуществлялось в Институте механики МГУ им. М. В. Ломоносова на двухдиафрагменной ударной трубе (DDST), на которой ранее была проведена серия экспериментов по определению характеристик излучения различных ударно-нагретых газов [9—11]. Схема установки и подробное описание основных технических параметров системы регистрации излучения за фронтом ударной волны приведены в [12]. Ударная труба имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром 50 мм. Иницирование ударной волны осуществляется за счет воспламенения в камере высокого давления стехиометрической смеси кислорода с водородом, разбавленной гелием (до 70 %). Скорость ударной волны измеряется с помощью пьезоэлектрических датчиков, смонтированных в стенке измерительной секции трубы на расстоянии 50 мм друг от друга.

Ударная труба оборудована двумя измерительными секциями, что позволяет в одном эксперименте определять временное и спектральное распределение излучения газа за фронтом ударной волны. Первая измерительная секция регистрирует временную эволюцию излучения одновременно с помощью двух спектрографов: MC-300 (ООО «МОПС», Россия) и V&M50 (Spektronik GmbH, Германия). Вторая секция измеряет интегральную по времени плотность излучения газа (панорамный спектр) в УФ и видимом диапазонах. Система регистрации УФ-излучения ( $\lambda = 190\text{—}670$  нм), собранная на базе спектрографа Horiba SP140-1824, фиксирует интегральное распределение спектральной яркости на линейном CCD-детекторе Hamamatsu S11156 при прохождении ударной волны через измерительное сечение трубы. Спектральный канал видимого диапазона ( $\lambda = 500\text{—}1100$  нм) собран на базе спектрографа Horiba SP140-1603. Для измерения абсолютных интенсивностей излучения в спектрах ударно-нагретого газа системы регистрации излучения калибровались путем стандартной процедуры сравнения с излучением известного калибровочного источника, в качестве которого использовалась дейтериевая лампа Hamamatsu для УФ-диапазона и лампа накаливания СИ-10 для видимого диапазона.

**Результаты и их обсуждение.** Получены данные по излучению чистого аргона за фронтом падающей ударной волны в диапазоне скоростей ударной волны  $V = 4.6\text{—}8.3$  км/с и давлений газа перед фронтом ударной волны  $p_0 = 0.25\text{—}5.00$  Торр. На рис. 1 приведен пример интегральной по времени развертки излучения (панорамный спектр) в интервале 190—1100 нм (УФ- и видимый диапазоны). Панорамные спектры дают представление об интенсивности излучения ударно-нагретого газа на различных участках в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа.

Видно, что излучение аргона состоит из линейчатого спектра атомов и ионов и непрерывного фона. Максимальная интенсивность излучения фона находится в диапазоне 400—500 нм, а максимум излучения линейчатого спектра на 700—950 нм. Поэтому при исследовании временных характеристик излучения слабых спектральных линий, расположенных в диапазоне  $\lambda < 650$  нм, необходимо учитывать вклад непрерывной составляющей фонового излучения в излучение соответствующей спектральной линии. Фоновое излучение сплошного спектра включает в себя тормозное и фоторекомбинационное излучения электронов низкотемпературной плазмы [13].

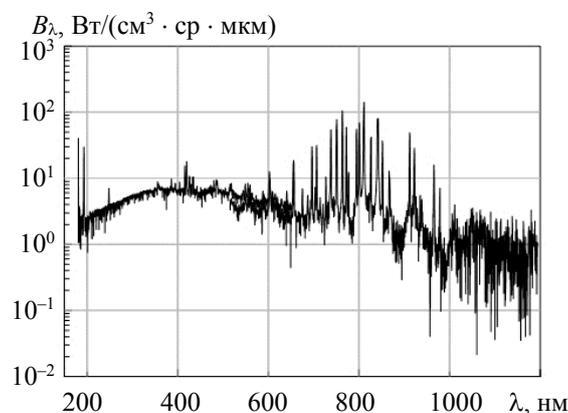


Рис. 1. Спектральная плотность излучения ударно-нагретого аргона при давлении перед ударной волной  $p_0 = 0.25$  Торр и скорости ударной волны  $V = 7.7$  км/с

В качестве примера измеренных временных зависимостей интенсивности излучения аргона выбраны спектральные линии  $\lambda = 420$  нм (УФ-диапазон) и 740 нм (видимый интервал). Эти линии имеют интенсивность, намного превышающую интенсивность фона (рис. 1). Временные осциллограммы, полученные при различных давлениях и скоростях ударной волны, представлены на рис. 2—4. На всех осциллограммах время  $t = 0$  соответствует положению газодинамического фронта ударной волны, определяемого с точностью 20 нс. Ширина регистрируемой спектральной полосы  $\Delta\lambda = 0.22$  нм. Можно выделить три характерных этапа временной эволюции излучения. На начальном этапе, определяющем время индукции излучения, происходит наработка электронов за счет атомарных столкновений. Второй этап характеризуется резким увеличением интенсивности излучения, который можно объяснить быстрым заселением возбужденных уровней атома аргона в процессе столкновений атомов с электронами. На третьем этапе происходит плавный спад интенсивности излучения за счет радиационного охлаждения.

Спектральная линия  $\lambda = 420$  нм описывает переход с уровня  $3s^23p^5(^2P^{03/2})5p$  (энергия уровня 14.499 эВ) на  $3s^23p^5(^2P^{03/2})4s$  (11.548 эВ). Как видно из рис. 2, а, длительность излучения данной линии за фронтом ударной волны, а также ее максимальная интенсивность увеличиваются с ростом начального давления. Аналогичная зависимость (рис. 2, б) наблюдается для спектральной линии  $\lambda = 740$  нм, которая описывает переход с уровня  $3s^23p^5(^2P^{01/2})4p$  (13.481 эВ) на  $3s^23p^5(^2P^{01/2})4s$  (11.828 эВ). Скорость ударной волны не играет такую важную роль, как давление, потому что в приведенных данных с увеличением давления скорость ударной волны уменьшается, хотя, как показано на рис. 2, в, снижение скорости ударной волны должно приводить к уменьшению максимальной интенсивности излучения.

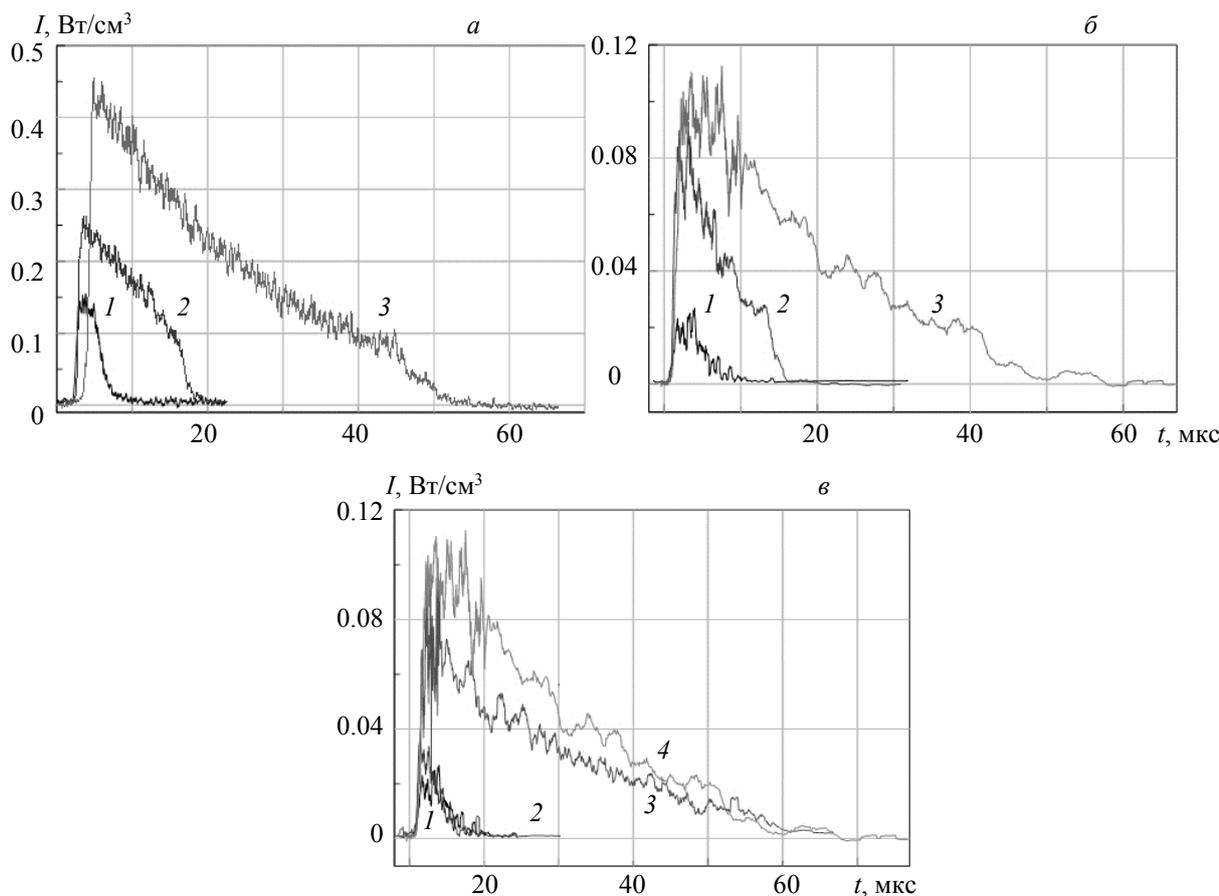


Рис. 2. Временные осциллограммы излучения линий атома аргона при  $\lambda = 420$  (а) и 750 нм (б, в):  
 а —  $p_0 = 0.25$  Торр,  $V = 7.58$  км/с (1);  $p_0 = 1.0$  Торр,  $V = 6.11$  км/с (2);  $p_0 = 5.0$  Торр,  $V = 4.63$  км/с (3);  
 б —  $p_0 = 0.25$  Торр,  $V = 8.33$  км/с (1);  $p_0 = 1.0$  Торр,  $V = 6.17$  км/с (2);  $p_0 = 5.0$  Торр,  $V = 4.85$  км/с (3);  
 в —  $p_0 = 0.25$  Торр,  $V = 8.33$  (1), 8.47 км/с (2);  $p_0 = 5.0$  Торр,  $V = 4.67$  (3), 4.85 км/с (4)

Изучение панорамных спектров, полученных при различных скоростях ударной волны, позволяет определить зависимость отношений интенсивностей фона и линии от скорости ударной волны. Как видно из рис. 3, где представлены осциллограммы излучения линии атома аргона 420 нм и излучения фона на  $\lambda = 532.8$  нм при скорости ударной волны  $\sim 6$  км/с и начальном давлении газа  $p_0 = 1$  Торр, это отношение сохраняется на протяжении всего времени излучения. Результаты сравнения профилей показывают, что вплоть до 8—10 мкс от начала излучения (фактически до конца области сжатого в ударной волне газа) соотношение между интенсивностями излучения фона и линии сохраняется практически постоянным.

Временные осциллограммы фонового излучения на  $\lambda = 532.8$  нм, находящейся в УФ-области спектра вблизи максимума фонового излучения, приведены на рис. 4. Как и в случае рассмотренных выше спектральных линий излучения атома аргона, длительность фонового излучения, а также максимальное значение его интенсивности увеличиваются с ростом начального давления. Как показывает сравнение (см. рис. 2), максимальная интенсивность линии атома аргона 420 нм в  $\sim 5$  раз выше, чем фона. Эти данные можно использовать для выделения интенсивности определенных линий атома аргона из суммарного излучения, включающего в себя фоновое излучение.

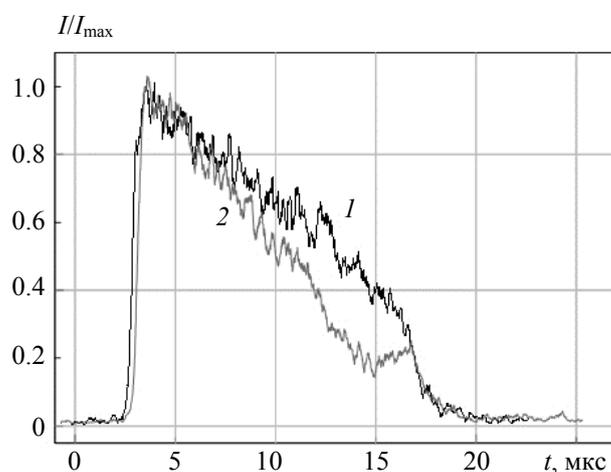


Рис. 3. Зависимости интенсивности спектральной линии атома аргона  $\lambda = 420$  нм (1) и излучения фона на  $\lambda = 532.8$  нм (2) при  $p_0 = 1$  Торр и  $V \sim 6$  км/с

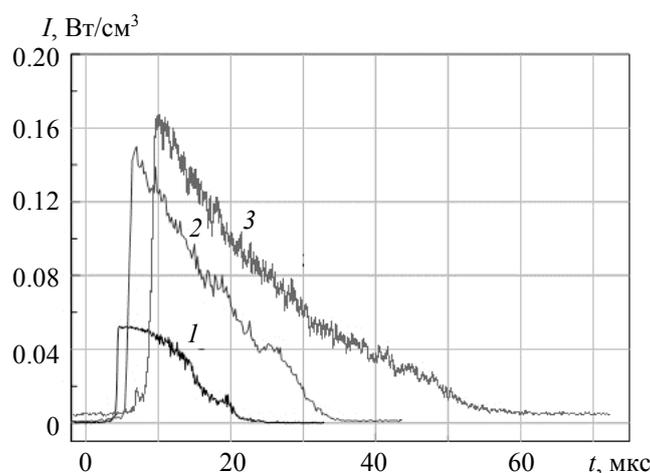


Рис. 4. Временные осциллограммы излучения фона на  $\lambda = 532.8$  нм при  $p_0 = 1.0$  Торр,  $V = 5.68$  км/с (1);  $p_0 = 2.5$  Торр,  $V = 5.15$  км/с (2);  $p_0 = 5.0$  Торр,  $V = 4.69$  км/с (3)

**Заключение.** Впервые измерены панорамный спектр и временные осциллограммы излучения атома аргона на длинах волн 420, 532.8 и 740 нм в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа. Анализ временных осциллограмм показывает, что эволюцию излучения можно разделить на три этапа: индукционный период, резкое увеличение интенсивности излучения и радиационное охлаждение. Показано, что длительность излучения, а также его максимальная интенсивность как для атомарных линий, так и для фона сильно увеличиваются с ростом начального давления. Зависимость интенсивности излучения от скорости ударной волны имеет менее выраженный характер. Полученные данные играют важную роль с точки зрения их применения при разработке адекватных расчетно-теоретических моделей, которые используются при оценке радиационного нагрева поверхностей пилотируемых спускаемых аппаратов.

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

- [1] С. Т. Суржиков. Изв. РАН. МЖГ, № 1 (2019) 99—144 [S. T. Surzhikov. Fluid Dynamics, **54**, N 1 (2019) 98—113]
- [2] R. J. E. Abrantes, A. R. Karagozian, D. Bilyeu, H. P. Le. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., **216**, N 1 (2018) 47—53
- [3] К.-В. Chai, D.-Н. Kwon. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., **227**, N 1 (2019) 136—144
- [4] M. G. Kapper, J.-L. Cambier. J. Appl. Phys., **109**, N 113308 (2011) 1—14
- [5] А. К. Шуайбов, А. И. Миня, А. Н. Малинин, З. Т. Гомоки, Р. В. Грицак. Журн. прикл. спектр., **78**, № 6 (2011) 927—931 [A. K. Shuaibov, A. I. Minya, A. N. Malinin, Z. T. Homoki, R. V. Hrytsak. J. Appl. Spectr., **78**, N 6 (2012) 867—872]
- [6] К. Е. Evdokimov, M. Е. Konischev, V. F. Pichugin, Z. Sun. Res.-Effic. Technol., **3**, N 2 (2017) 187—193
- [7] J.-Н. Sun, S.-R. Sun, L.-Н. Zhang, H.-X. Wang. Plasma Chem. Plasma Proc., **40**, N 11 (2020) 1383—1400
- [8] K. Dzierżęga, W. Zawadzki, F. Sobczuk, M. L. Sankhe, S. Pellerin, M. Wartel, W. Olchawa, A. Baclawski, B. Bartecka. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., **237**, N 106635 (2019) 1—8
- [9] И. Е. Забелинский, Л. В. Ибрагимова, О. П. Шаталов. Журн. прикл. спектр., **73**, № 1 (2006) 13—17 [I. E. Zabelinskii, L. V. Ibragimova, O. P. Shatalov. J. Appl. Spectr., **73**, N 1 (2006) 10—15]
- [10] L. V. 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
- [11] P. V. Kozlov. J. Phys.: Conf. Ser., **1009**, N 012024 (2018) 1—6
- [12] Н. Г. Быкова, И. Е. Забелинский, Л. В. Ибрагимова, П. В. Козлов, С. В. Стовбун, А. М. Тереза, О. П. Шаталов. Хим. физика, **37**, № 2 (2018) 35—41 [N. G. Bykova, I. E. Zabelinskii, L. V. Ibragimova, P. V. Kozlov, S. V. Stovbun, A. M. Tereza, O. P. Shatalov. Russ. J. Phys. Chem. B, **12**, N 1 (2018) 108—114]
- [13] Y.-D. Jung, C.-G. Kim. J. Plasma Phys., **67**, N 2-3 (2002) 191—197