

Excitation and Emission of Argon behind the Front of Shock Waves at Speeds of $4.5 \div 7.8$ km/s.

I. Experiment

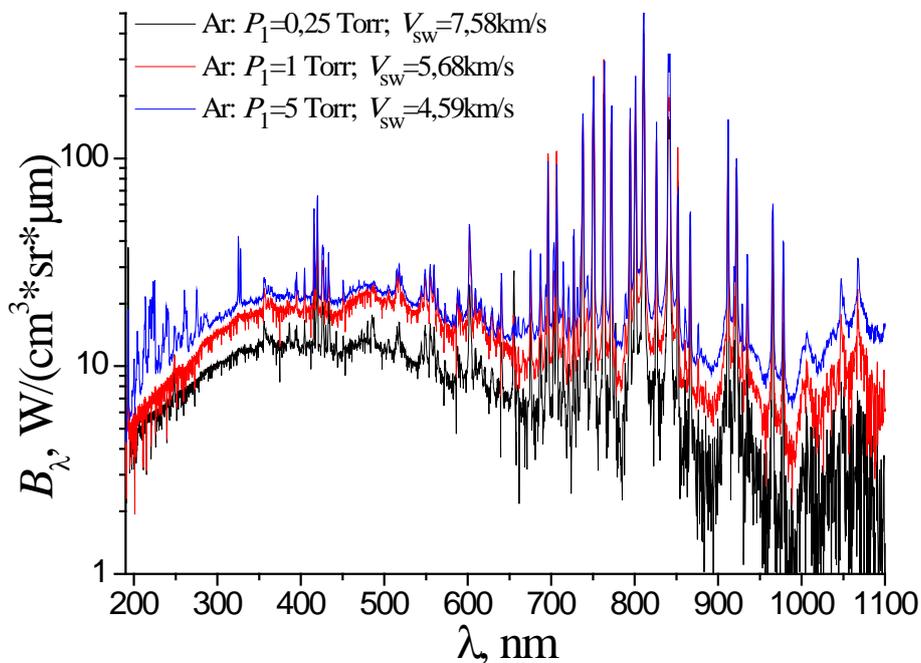
N.G. Bykova, I.E. Zabelinskii, L.B. Ibraguimova, P.V. Kozlov, V.Yu Levashov
and O.P. Shatalov

*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia
kalevala@mail.ru*

Abstract

The paper presents experimental data on the emission of pure argon behind the front of a strong shock wave in the $4.5 \div 7.8$ km/s velocity range and the pressures ahead of the wave front of $0.25 \div 5$ Torr. Integral time sweeps of the radiation (panoramic spectra), as well as time dependences of the intensity of argon radiation for wavelengths of 315, 420, 532.8, 696.5 and 738 nm in absolute units are given. Information is received on the delay time, the rate of radiation growth and its maximum intensity, depending on the velocity of the shock wave. The above experimental data make it possible to construct more accurate kinetic models of nonequilibrium ionization and radiation processes behind the front of the shock wave.

Keywords: shock wave, experiment, nonequilibrium radiation, argon, rate constant of excitation.



Time integral radiation spectrum of argon for different conditions behind the front of the shock wave

УДК 533.6.071+533.6.078+533.92+535.23+51.72

Возбуждение и излучение аргона за фронтом ударных волн при скоростях $4.5 \div 7.8$ км/с.

I. Экспериментальное исследование

**Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, Л.Б. Ибрагимова, П.В. Козлов,
В.Ю. Левашов, О.П. Шаталов**

*НИИ Механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1
kalevala@mail.ru*

Аннотация

В работе представлены экспериментальные данные по излучению чистого аргона за фронтом сильной ударной волны в диапазоне скоростей $4.5 \div 7.8$ км/с и давлений перед фронтом волны $0.25 \div 5$ Торр. Приведены интегральные по времени развертки излучения (панорамные спектры), а также временные зависимости интенсивности излучения аргона для длин волн 315, 420, 532.8, 696.5 и 738 нм в абсолютных единицах. Получена информация о времени задержки, скорости роста излучения и его максимальной интенсивности в зависимости от скорости ударной волны. Приведенные экспериментальные данные дают возможность построить более точные кинетические модели неравновесных процессов ионизации и излучения за фронтом ударной волны.

Ключевые слова: ударная волна, эксперимент, неравновесное излучение, аргон, константа скорости возбуждения.

1. Введение

При расчете тепловой нагрузки на поверхность спускаемого космического аппарата (КА) при входе в плотные слои атмосферы необходимо учитывать физико-химические процессы, происходящие у поверхности аппарата. Вместе с тем, как отмечается, например, в [1], «ряд задач физико-химической механики и радиационной газовой динамики, связанных с повышением достоверности предсказательных аэрофизических моделей, остаются нерешенными до настоящего времени. Среди них: развитие кинетических моделей неравновесной ионизации, моделей релаксационных и радиационных процессов, решение задач переноса неравновесного теплового излучения». В то же время учет этих процессов необходим, поскольку влияние, в частности, излучения газов на радиационный нагрев поверхности КА может оказаться значительным.

Выполненное в настоящей работе исследование излучения аргона направлено на решение части из указанных задач. Аргонная плазма, спектр излучения которой исследуется в настоящей работе, является удобным объектом как для тестирования радиационно-столкновительных моделей излучения горячих газов, так и для установления ведущих физических процессов в газе, связанных с ионизацией, образованием электронов, возбуждением энергетических уровней атомов и их дезактивацией в условиях высоких температур за фронтом сильных ударных волн.

Исследованию радиационных характеристик атомов аргона в широком интервале температур и длин волн посвящено значительное количество экспериментальных работ. Такие работы выполняются на плазматронах, в разрядах, с помощью электронных пучков. Большая часть работ относится к исследованию аргона в ударных трубах, поскольку при

этом достаточно успешно моделируется ударная волна перед спускаемым аппаратом и за фронтом волны можно получить температуру в несколько десятков тысяч градусов.

В качестве одного из направлений исследований радиационных характеристик аргона являются работы по определению атомных констант спектральных линий, в частности, вероятностей переходов. К числу первых таких исследований можно отнести работы [2–4]. Некоторые публикации содержат обширную библиографию и обзор проводимых ранее исследований [5–8]. Результаты этих исследований систематизированы в [9].

К первым экспериментальным работам, в которых рассматривался процесс ионизации аргона, можно отнести работы [10–13]. В [13] отмечается, что при рассмотрении процессов, происходящих в ударно нагретом аргоне и в других инертных газах при числах Маха $M = 10 \div 18$ обнаруживается довольно значительное (десятки микросекунд) время задержки начала ионизации за фронтом ударной волны. В [10] показано, что процесс ионизации за сильной ударной волны в аргоне осуществляется в два этапа, причем на начальном этапе скорость ионизации зависит от чистоты аргона в ударной трубе. Авторы отмечают, что электрон-атомные столкновения – это основной процесс в образовании ионов аргона, причем начальные электроны на первом этапе образуются при ионизации легко ионизируемых примесей. В [10] уровень примесей в аргоне в основном определялся качеством откачки труб. (Работа выполнялась на двух трубах, и вакуум достигал $0.04 \div 0.001$ Торр). На втором этапе ионизация осуществляется в результате процесса столкновений аргона с электронами, рождёнными уже при ионизации самого аргона.

В работе [14] с использованием методики микроволнового зондирования ударной волны, отражающейся от ионизованного в волне газа, измерено время задержки нарастания концентрации электронов до концентрации $1.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от температуры.

В некоторых работах отмечается необходимость исследования влияния паров материала стенки, образующиеся у стенок канала ударной трубы, что приводит к генерации поперечных волн сжатия, влияющих на сокращение времени задержки ионизации. В частности, в [15] установлена зависимость задержки свечения аргона за ударным фронтом от материала внутренней поверхности канала. Установлено также, что в пристеночных слоях яркость свечения значительно выше, чем на оси трубы.

В работе [16] экспериментально исследуются механизмы формирования инверсной заселенности электронно-возбужденных состояний атомов ArI в ионизованных сверхзвуковых струях. Эксперименты проводились в двумерной недорасширенной струе, истекающей из торца ударной трубы диаметром 50 мм, соединенной с плоской вакуумной камерой, при следующих параметрах торможения: $T_2 = 7 \div 13 \times 10^3 \text{ К}$, $P_2 = 1 \div 20 \text{ атм}$. Как отмечают авторы работы, в результате эксперимента «впервые обнаружена инверсная заселенность на $4p' [3/2] - 4s' [1/2]^0$ переходе ArI».

В [17] исследуется населенность метастабильных состояний в аргоновой плазме, образующейся в цилиндрическом полем катоде в диапазоне давлений $0.3 \div 1$ Торр. Населенности двух метастабильных состояний (3P_2 и 3P_0) измерялись по поглощению света на длинах волн 772.42 и 772.38 нм, соответствующих переходам $3s^2 3p^5 4s^2 [1/2] \rightarrow 3s^2 3p^5 4p^2 [1/2]$ и $3s^2 3p^5 4s^2 [3/2] \rightarrow 3s^2 3p^5 4p^2 [3/2]$. Используемая авторами модель дает хорошее согласие с экспериментальными данными по населенностям метастабильных состояний при низких давлениях, но при давлениях 1 Торр отличается от результатов эксперимента в 2 раза.

В работе [18] рассматривается процесс начальной ионизации ударно нагретого аргона в диапазоне начальных давлений $0.2 \div 3$ Торр и температур за фронтом ударной волны от 7000 до 12000 К. В отличие от выводов работы [10], основной причиной возникновения ионов аргона на начальной стадии ионизации авторы считают неупругие столкновения атомов аргона между собой. Это утверждение авторов основано на низких концентрациях примесей в проводимых экспериментах.

В ряде работ исследуется зависимость скорости ионизации газа за фронтом волны от температуры электронов. Кинетика нагрева электронов в области лавинной ионизации од-

ноатомных газов за фронтом ударной волны исследуется в работах [19–23]. В настоящей работе основное внимание уделено измерению абсолютных интенсивностей излучения нескольких спектральных линий аргона за фронтом ударных волн в диапазоне скоростей $4.5 \div 7.8$ км/с и начальных давлений газа перед фронтом ударной волны $0.25 \div 5$ Торр. В работе представлены данные по абсолютным интенсивностям, временам задержки и темпам нарастания излучения.

2. Экспериментальные установки

Эксперименты по измерению интенсивности излучения аргона за фронтом ударных волн выполнялись на двух ударных трубах (УТД и УТС). Обе трубы имеют цилиндрическую форму с внутренним диаметром 50 мм. В качестве толкающего газа в камерах высокого давления использовалась стехиометрическая кислородно-водородная смесь, на $45 \div 70\%$ разбавленная гелием и поджигаемая искровым разрядом. В качестве диафрагмы, разделяющей камеры высокого и низкого давления, использовалась медная фольга толщиной 0.15–0.5 мм с калиброванными насечками. Каждая из труб оборудована двумя измерительными секциями с оптическими окнами со щелями 0.1 мм. Наличие двух измерительных секций позволяет в одном эксперименте регистрировать временное и спектральное распределение излучения газа за фронтом ударной волны. Для измерения абсолютных интенсивностей излучения в спектрах ударно-нагретого газа все каналы калибровались путем стандартной процедуры сравнения с излучением известного калиброванного источника, в качестве которого использовались дейтериевая лампа "Hamamatsu" для ультрафиолетового диапазонов и лампа накаливания СИ-10 для видимого диапазона спектра.

Измерение скорости ударной волны осуществлялось с помощью пьезоэлектрических датчиков, расположенных симметрично по обе стороны относительно оптических окон. Сигналы с датчиков регистрировались осциллографами. Погрешность измерения скорости не превышала 1%, что следует из неопределенности геометрических и временных факторов (точности установки, размеров и реакции инерции датчиков). Момент прихода фронта ударной волны в измерительное сечение с точностью ± 100 нс определялся как середина интервала времени между сигналами от первого и второго пьезодатчиков. Методика определения положения фронта волны подробно изложена в [24].

Откачка обеих труб осуществлялась с помощью турбомолекулярных насосов HiPace 80 до остаточного давления 2×10^{-5} Торр. Натекание в установках не превышало 10^{-5} Торр/мин, и определялось в основном десорбцией газа со стенок. Количество неконтролируемых примесей в экспериментах не превышало 3×10^{-5} Торр.

Первая измерительная секция трубы УТД использовалась для регистрации временной эволюции излучения за фронтом ударной волны одновременно с помощью двух спектрографов С-300 и В&М50. На спектрографе В&М50 проводилось также регистрация на ICCD камеру интегральных по времени спектров излучения в различных спектральных диапазонах со спектральным разрешением до 0.04 нм.

Второе измерительное сечение трубы УТД использовалось для одновременной регистрации излучения в ультрафиолетовом (UV) и видимом (VIS) диапазонах спектра. Спектральный канал UV, регистрирующий излучение в диапазоне $190 \div 670$ нм, собран на базе спектрографа Horiba SP140-1824. Канал VIS, регистрирующий излучение в диапазоне $500 \div 1100$ нм, собран на базе спектрографа Horiba SP140-1603. Оба спектрографа оснащены стробируемыми CCD линейками Hamamatsu S11156.

В экспериментах по регистрации временной эволюции излучения на трубе УТС в качестве спектрального прибора в первой измерительной секции использовался монохроматор ВМ-1 с фокусным расстоянием $f=500$ мм, работающий по схеме Сейя–Намиока. Обратная дисперсия прибора ВМ-1 составляет ~ 3.5 нм/мм – с дифракционной решеткой 600 штр/мм. Спектральный интервал – $185 \div 650$ нм.

Во втором измерительном канале трубы УТС при измерении временных характеристик излучения в качестве спектрального прибора использовался монохроматор, работающий по вертикальной схеме Черни–Турнера, фокусное расстояние прибора составляет 300 мм. Обратная дисперсия при работе с дифракционной решеткой 300 штр/мм составляет 11 нм/мм. В качестве приемника излучения использовался ФЭУ 77348 фирмы ORIEL Instruments, регистрируемый диапазон спектра составлял 185–800 нм. Этот же монохроматор, сопряженный с многоканальным оптическим регистратором спектра МОРС-1/2048, использовался в экспериментах по регистрации панорамных спектров. Полученные на указанных двух ударных трубах результаты совпадают друг с другом в пределах точности измерений и представлены ниже.

3. Результаты экспериментов

На рис. 1–9 представлены экспериментальные данные по излучению чистого аргона за фронтом ударной волны в диапазоне скоростей ударных волн $4.5 \div 7.8$ км/с и давления газа перед фронтом $0.25 \div 5$ Торр. На рис. 1–2 приведены интегральные по времени развёртки излучения (панорамные снимки) в спектральном интервале $200 \div 1100$ нм. Панорамные снимки дают представление об интенсивности излучения газа в различных участках спектра в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа.

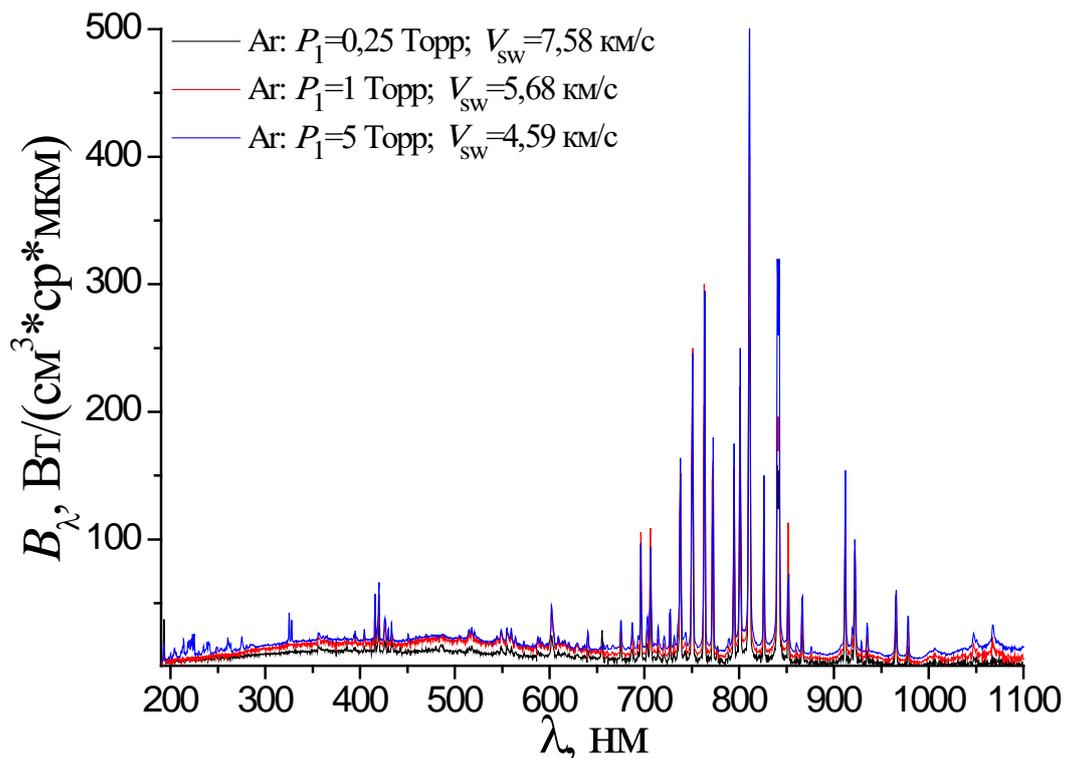


Рис. 1 Интегральная по времени плотность излучения аргона за фронтом ударной волны

Из рис. 1 видно, что излучение аргона состоит из линейчатого спектра атомов и непрерывного фона. Максимальная интенсивность излучения фона находится в спектральном диапазоне $400 \div 500$ нм, а максимум излучения линейчатого спектра приходится на диапазон $700 \div 950$ нм. По-видимому, излучение в непрерывном спектре определяется тормозным излучением электронов за фронтом ударной волны.

В спектрах излучения УВ, представленных на рис. 1, вместе с изменением давления меняется и скорость УВ. Влияние именно скорости УВ на спектр излучения демонстрируют данные рис. 2, полученные при давлении 1 Торр для набора скоростей.

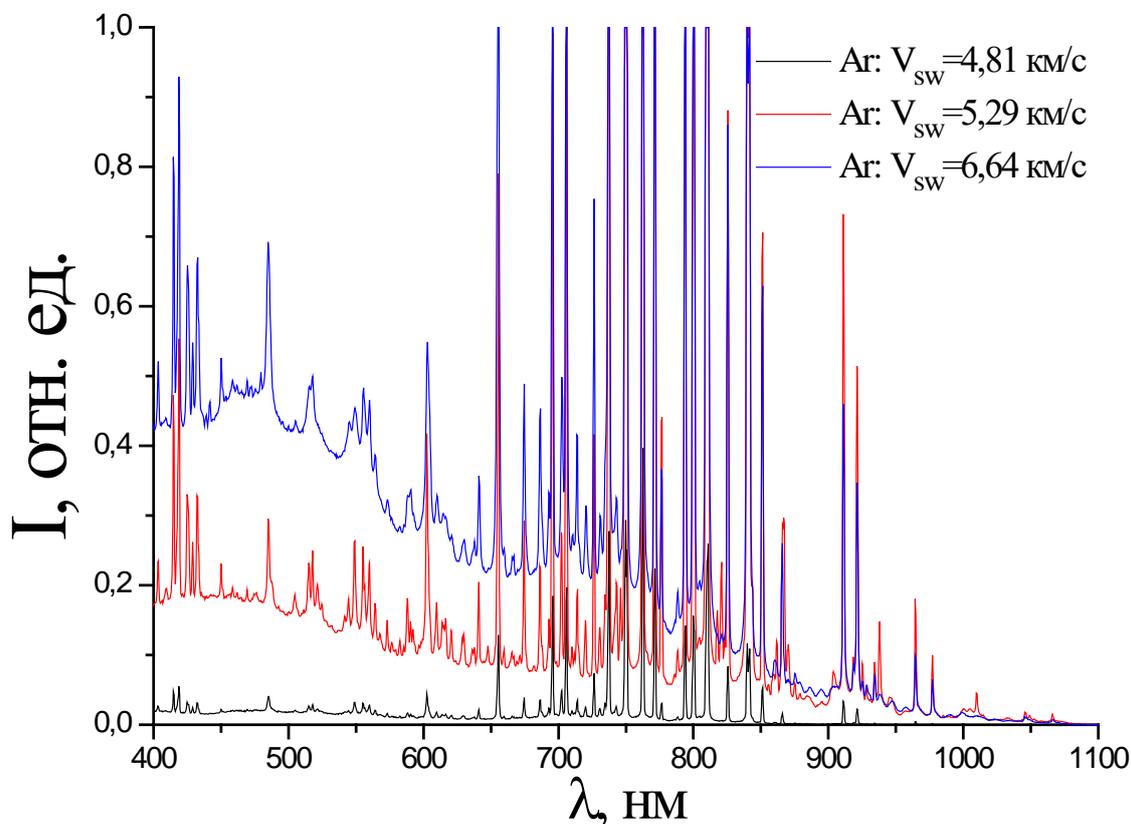


Рис. 2. Панорамные спектры излучения ударной волны в аргоне при начальном давлении 1 Торр и различных скоростях ударной волны. Кривые разного цвета соответствуют скоростям ударной волны, указанным на графике. Интенсивность атомарных линий аргона в диапазоне 650 ÷ 850 нм не показана (см. рис. 1)

Анализ приведенных выше панорамных спектров показывает, что при исследовании временных характеристик излучения слабых спектральных линий, расположенных в диапазоне $\lambda < 650$ нм, необходимо учитывать вклад в излучение непрерывной составляющей сплошного спектра фонового излучения. Из панорамных спектров, приведенных на рис. 2, была определена зависимость отношения между интенсивностями фона и линии от скорости ударной волны. Иллюстрацию того, что это отношение примерно сохраняется на протяжении всего времени излучения, дают данные рис. 3, на котором в относительных единицах представлены осциллограммы излучения линии атома аргона 420 нм (синяя кривая) и излучения фона на длине волны 532.8 нм (красная кривая) при скорости ударной волны около 6 км/с и начальном давлении газа 1 Торр. Результаты сравнения профилей показывают, что вплоть до 8 ÷ 10 мкс от начала излучения (фактически до конца области сжатого в ударной волне газа) соотношение между интенсивностью излучения линии и интенсивностью фона сохраняется практически постоянным.

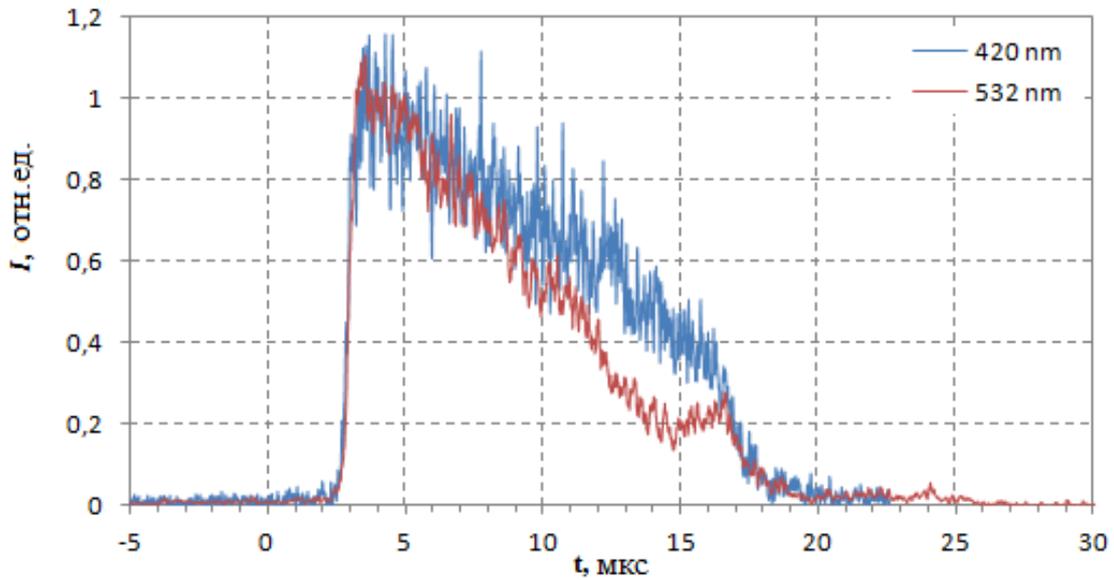


Рис. 3. Зависимость интенсивности спектральной линии атома аргона 420 нм (синяя кривая), и интенсивности излучения фона на длине волны 532.8 нм (красная кривая), $P_0 = 1$ Торр, $V_{sw} \sim 6$ км/с. Интенсивность каждой кривой отнесена к её максимальной величине

На рис. 4 приведены образцы зарегистрированного фонового излучения в области спектра 315 и 532.8 нм при начальном давлении 1 и 5 Торр.

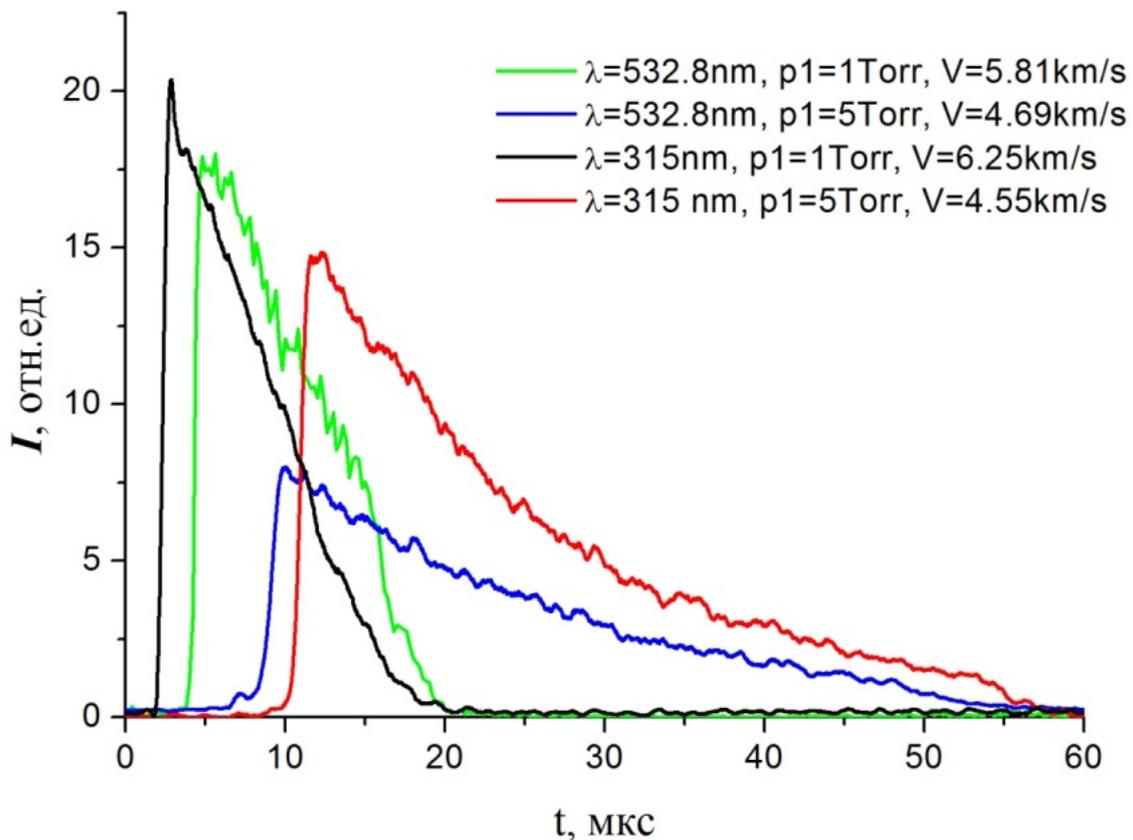


Рис. 4. Временная зависимость фонового излучения в аргоне на длине волны 315 и 532.8 нм

На рис. 5–7 представлены временные осциллограммы излучения линий атома аргона 420, 696.5 и 738.4 нм при различных скоростях ударной волны и давлении 1 Торр.

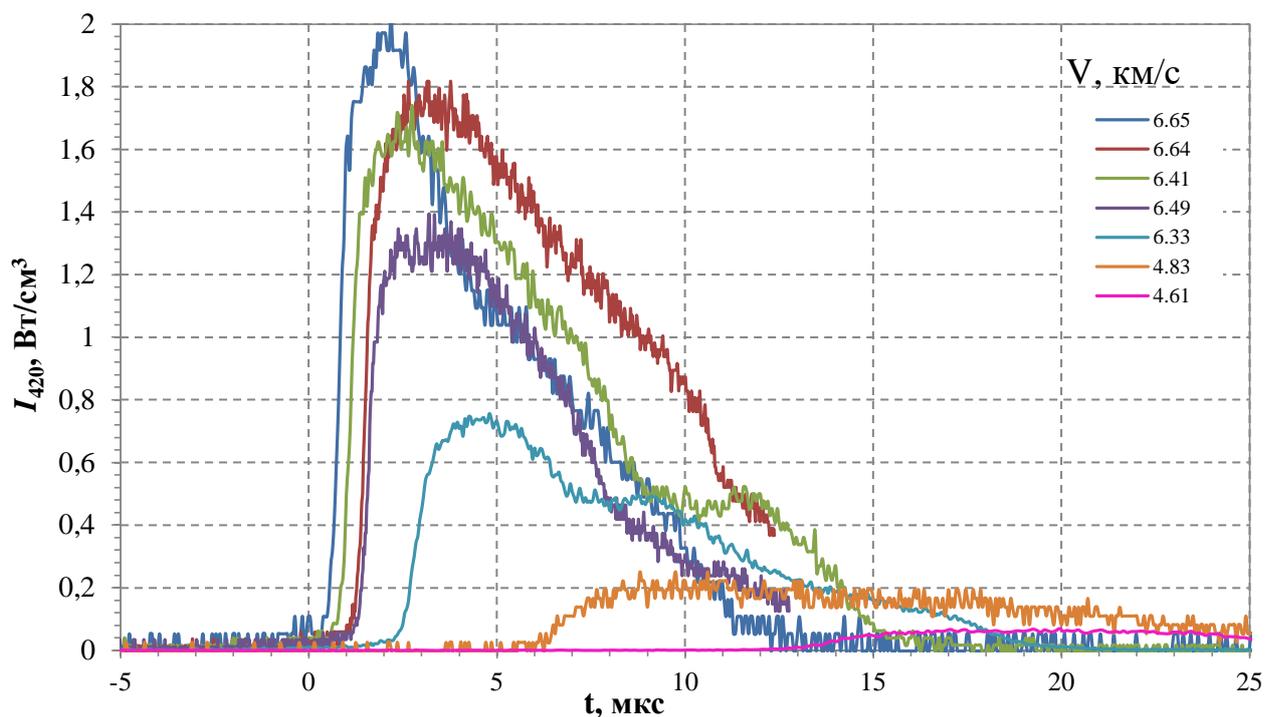


Рис. 5. Временные осциллограммы излучения линии 420 нм атома аргона при начальном давлении 1 Торр и различных скоростях ударной волны

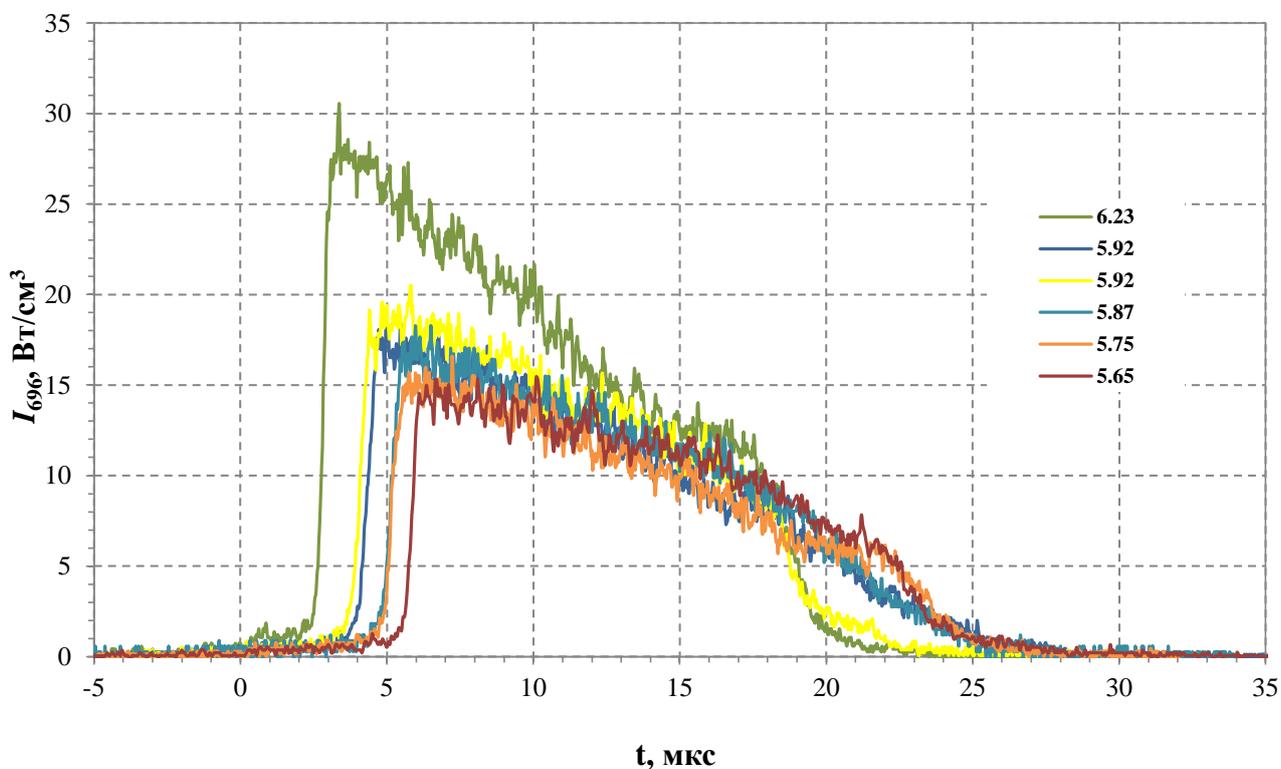


Рис. 6. Временные осциллограммы излучения линии 696.5 нм атома аргона при начальном давлении 1 Торр и различных скоростях ударной волны

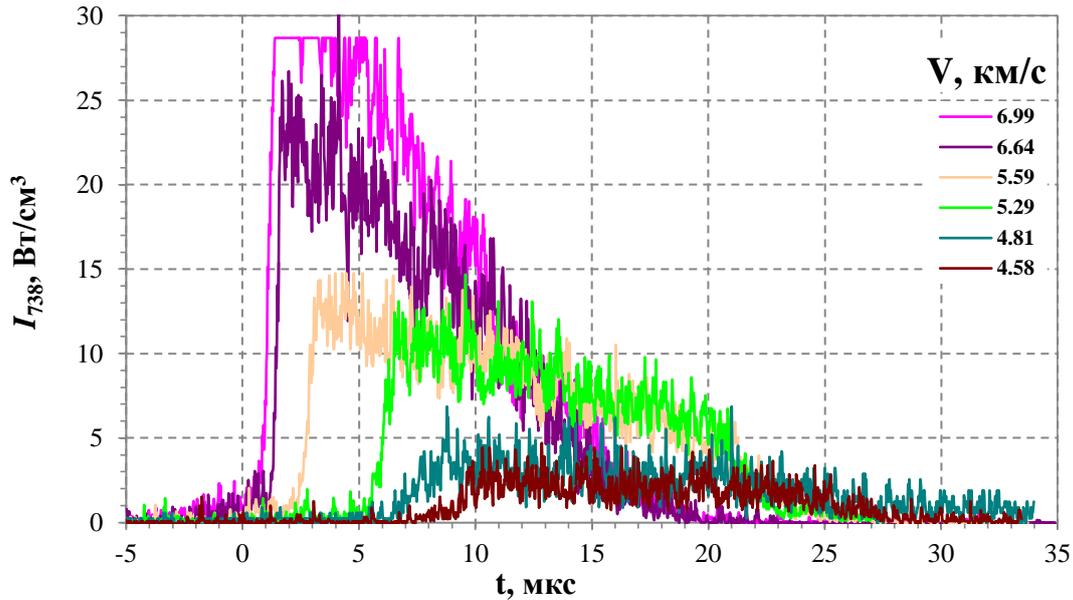


Рис. 7. Временные осциллограммы излучения линии 738.4 нм атома аргона при начальном давлении 1 Торр и различных скоростях ударной волны.

Рисунки 5–7 наглядно иллюстрируют зависимость величины максимальной интенсивности излучения, времени начала излучения и скорости его нарастания от скорости ударной волны.

Так на рис. 8 представлена зависимость максимальной интенсивности излучения спектральной линии 420 нм от скорости ударной волны при давлении 1 Торр.

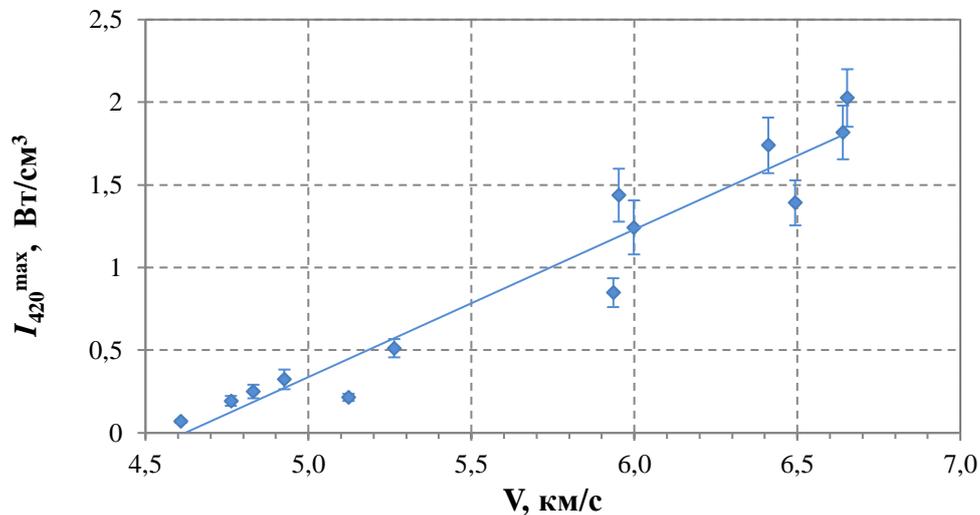


Рис. 8. Зависимость максимальной интенсивности излучения линии 420 нм, от скорости ударной волны при начальном давлении аргона $P_1 = 1$ Торр.

Важной характеристикой радиационных процессов в ударно нагретом газе является время задержки излучения, то есть временной интервал между моментом образования фронта ударной волны и началом лавинообразного нарастания интенсивности излучения. В эксперименте это регистрируется как временной интервал от прихода ударной волны в «окно наблюдения» (момент времени 0 на рис. 5, 6, 7) до начала крутого роста сигнала фотомножителя. Представленные выше временные осциллограммы позволяют построить обобщающий график наблюдаемой зависимости времени задержки от скорости ударной волны.

Эти результаты для трех линий атома аргона 420, 696.5 и 738.4 нм представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что время задержки излучения на всех трех наблюдаемых переходах уменьшается с увеличением скорости ударной волны.

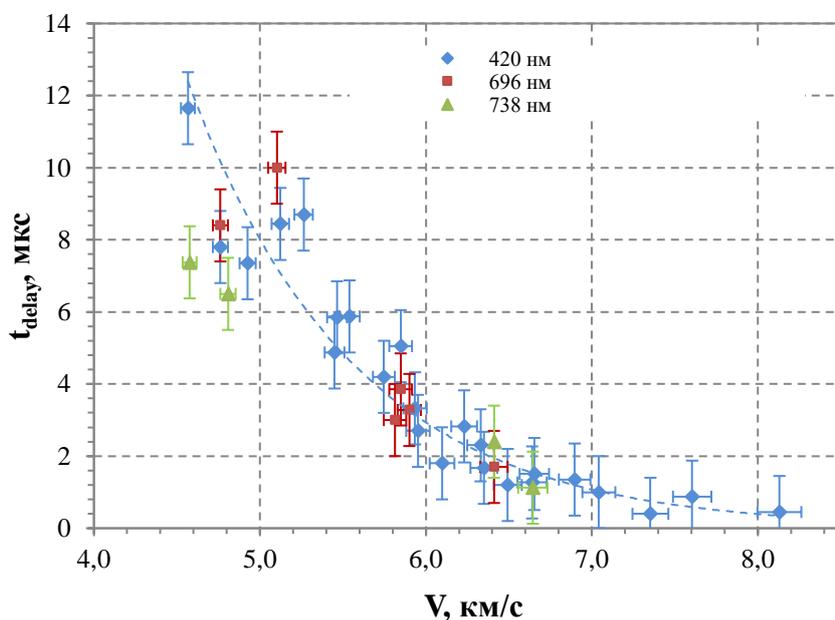


Рис. 9. Зависимость времени задержки излучения от скорости ударной волны при начальном давлении $P_1 = 1$ Торр.

Из представленных выше результатов (см. рис. 5–7) также видно, что темп лавинообразного нарастания интенсивности излучения зависит от скорости ударной волны. Обобщающий график скорости нарастания интенсивности излучения аргона от скорости ударной волны представлен на рис. 10.

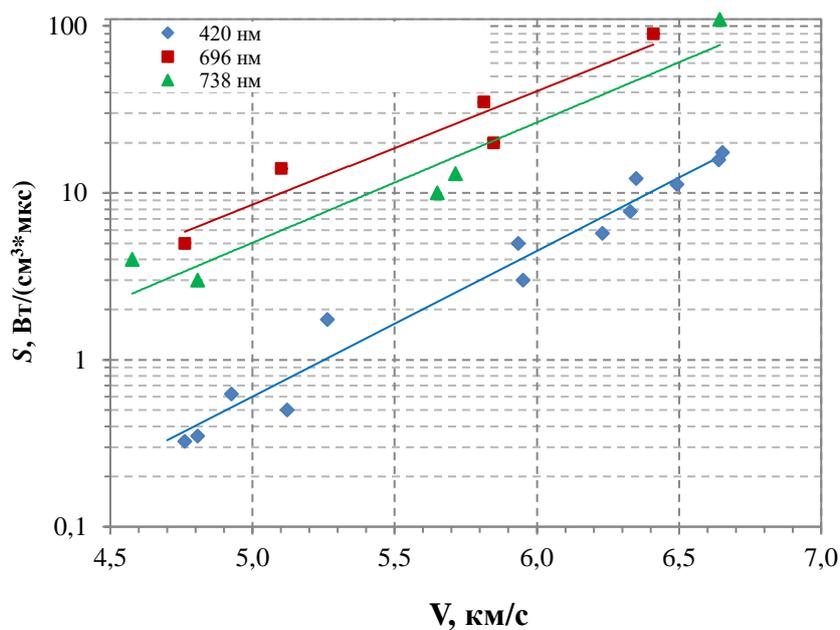


Рис. 10. Зависимость скорости нарастания интенсивности излучения аргона от скорости ударной волны

4. Заключение

В работе получены данные об излучении аргона в широком диапазоне скоростей ударных волн и в широком спектральном интервале. В частности, измерены времена задержки излучения (или период индукции) за фронтом волны, измерено время лавинообразного нарастания излучения, получены абсолютные значения интенсивности излучения и их значения в максимуме на различных длинах волн. Анализ этих данных позволяет строить модели и получать константы скоростей наблюдаемых процессов, что является основой для расчета тепловых потоков излучающих газов. Указанный анализ является содержанием следующей публикации.

Литература

1. Суржиков С.Т. Радиационный нагрев поверхности сверхорбитальных спускаемых космических аппаратов с учетом атомных линий// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/235/>
2. Wiese W.L, Smith M. W., Glennon B.N. Atomic transition probabilities //1966. V.I. NSRDS-NBS 4. USA.
3. Wiese W.L, Smith M. W., Miles B.M. Atomic transition probabilities //1966. V.II. NSRDS-NBS 22. USA
4. Konjevic N, Wiese W.L Experimental stark widths and shifts for non hydrogenic spectral lines of ionized atoms. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1976. V. 5. N2. Pp. 259–308.
5. Pellerin S., Musiol K., Dzierzega K., Chapelle J Measurement of Atomic Parameters of Singly Ionized Argon Lines. – II Transition Probabilities//JQSRT. 1997. V.57. N.3. Pp.359–376.
6. Pellerin S., Musiol K., Dzierzega K., Chapelle J Measurement of Atomic Parameters of Singly Ionized Argon Lines. – III. Stark Broadening Parameters // JQSRT. 1997. V.57. N.3. Pp.377-391.
7. Vujnovic V., Wiese W.A. Critical Compilation of Atomic Transition Probabilities for Singly Ionized Argon // J. Phys. Chem. Ref Data. 1992. V.21. N.5. Pp. 919–939.
8. Konjevic N., Wiese W Experimental Stark Widths and Shifts for Spectra Lines of Neutral and Ionized Atoms // J/ Phys. Chem. Ref. Data. 1990. V.19. N.6. Pp. 1307–1385.
9. Wiese W.L., Fuhr J.R. NIST Atomic Spectra Database. Lines Data // http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd
10. H. Petschek, S. Byron. Approach to Equilibrium Ionization behind Strong Shock Waves in Argon // Annals of physics: 1957. V.1. No 3. P. 270-315.
11. Resler E.L., Lin Sh.-C., Kantrowitz A. The Production of High Temperature Gases in Shock Tubes// Journal of Applied Physics. 1952. V.23. No 12. Pp. 1390–1399.
12. Petschek H.E., Rose P.H., Glick H.S., Kane A., and Kantrowitz A. Spectroscopic Studies of Highly Ionized Argon Produced by Shock Waves// J. Appl. Phys. 1955.V. 26. Pp. 83–95.
13. Солоухин Р.И. Физические исследования газов с помощью ударных волн // УФН. 1959. Т.68. No.3. С.514–527.
14. Смехов Г.Д., Лобастов Ю.С. К вопросу о начальной стадии ионизации аргона за фронтом ударной волны//ЖТФ. 1970. Т. XL. № 8. С.1660–1663.
15. Савров С.Д. О роли испарения стенок канала в исследованиях ионизационной релаксации ударно-нагретых инертных газов//ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С.ЖТФ 798–802.
16. Баженова Т.В., Емельянов А.В., Еремин А.В., Шумова В.В. Рекомбинационное излучение перехода (4 p- 4 s) Ar ($\lambda=852$ нм) в неравновесно-ионизованной струе//ЖТФ, 1994, Т.64, Вып. 3. С. 26–33.
17. Bague N., Bogaerts A., Donko Z., Gijbels R., Sadeghi N. Study of the Ar metastable atom population in a hollow cathode discharge by means of a hybrid model and spectrometric measurements// Journal of Applied Physics. 2005. V.97. 123305.
18. McLaren T.I., Hobson R.M. Initial Ionization Rates and Collision Cross Sections in Shock Heated Argon//Phys. Fluids .1968. V.11. P. 2162-2171. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1691798>
19. Постников Б.В., Яковлев В.И. Скорость лавинной ионизации и механизмы энергетического обмена в плазме аргона за фронтом ударной волны // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 17. С. 82–88.

20. Яковлев В.И. Радиационная релаксация плазмы аргона в ударных волнах // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 89–94.
21. McIntyre T.J., Houwing A.F.P., Sanderman R.J. et. al. Relaxation behind shock waves in ionizing neon // J. Fluid Mech. 1991. V.227. Pp. 617–640.
22. McIntyre T.J., Houwing A.F.P., Bachor H. A. et. al. Absorption measurements of the 1s5 metastable state population behind unstable shock waves in ionizing argon //Proc. 16th Int. Symp. Shock Tubes and Waves. Aachen. 1987. Pp.161–168.
23. Oettinger P.E., Bershader D. A. Unified Treatment of the Relaxation Phenomenon in Radiating Argon Plasma Flows // AIAA J. 1967. V.5. N 9. Pp. 1625–1632.
24. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Определение положения газодинамического фронта ударной волны//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. Вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/220/>

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.