

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-НАГРЕТОГО ВОЗДУХА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ 120 ÷ 900 НМ: ПАНОРАМНЫЙ СПЕКТР И ЭВОЛЮЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Н.Г. Быкова, И.Г. Герасимов, И.Е. Забелинский, Л.Б. Ибрагимова, О.П. Шаталов

*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1*

Аннотация

На ударной трубе проведены эксперименты по измерению интенсивности излучения воздуха за фронтом падающей ударной волны при начальном давлении 0.25 Торр и скоростях ударных волн $6.3 \div 8.4$ км/с. Измерения выполнены также в смесях воздуха (10%) с аргоном, кислорода (10%) с аргоном и азота (10%) с аргоном при скоростях $4.7 \div 6.8$ км/с. Интенсивность излучения измерялась в абсолютных единицах как в виде распределения по спектру в интервале длин волн 120–400 нм (панорамные спектры), так и в виде временной эволюции излучения за фронтом ударной волны на отдельных атомарных линиях N и O. Результаты измерений продемонстрировали, что излучение в воздухе за ударной волной в области вакуумного ультрафиолета (120 ÷ 200 нм) имеет существенно большую мощность радиационного потока, чем излучение в области 200 ÷ 900 нм.

INVESTIGATION OF SHOCK-HEATED AIR RADIATION IN SPECTRAL RANGE 120 ÷ 900 NM: PANORAMIC SPECTRA AND RADIATION EVOLUTION BEHIND THE FRONT OF SHOCK WAVE

N.G. Bykova, I.G. Gerasimov, I.E. Zabelinsky, L.B. Ibraguimova, O.P. Shatalov

¹Institute of Mechanics, Moscow State University, Russia, Moscow, 119899

The measurements of air radiation power behind the shock waves front were carried out at initial pressure 0.25 Torr and shock wave velocities $6.3 \div 8.4$ km/s. The measurements were also performed in gas mixtures of air (10%) with argon, of oxygen (10%) with argon and nitrogen (10%) with argon at shock velocities $4.7 \div 6.8$ km/s. The radiation intensity in absolute units was measured as spectral distribution in wavelength range 120 ÷ 400 nm as well as temporal evolution of radiation behind the shock wave. In the latter case the radiation was detected in narrow spectral ranges corresponding to the positions of atomic N and O lines. The results of experiments demonstrated that the air radiation power in shock wave in range of vacuum ultraviolet (120 ÷ 200 nm) is considerably greater than in range 200 ÷ 900 nm

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в развитии космических исследований и необходимость учета теплового потока около спускаемого аппарата за счет радиационного нагрева вызвали к жизни ряд исследований, в которых были поставлены задачи измерения радиационных потоков за фронтом ударной волны в широком диапазоне длин волн, при малых начальных давлениях и высоких скоростях [1–2]. В [3–7] были предложены различные модели для количественного описания радиационных потоков.

В настоящей работе представлены результаты измерения в ударной трубе спектральных и временных характеристик излучения нагретого воздуха в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ), ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазонах спектра.

Известно, что в области ВУФ мощность излучения при высоких скоростях ударных волн существенно выше, чем в видимой области [2]. В связи с этим данные по временной эволюции излучения за фронтом ударной волны были получены прежде всего в области ВУФ. От аналогичных результатов, например, работы [1], они отличаются тем, что излучение регистрировалось в более узких спектральных интервалах, что позволяет наблюдать отдельно эволюцию излучения с различных энергетических уровней атомов N и O (или

атомарных ионов), являющихся основными компонентами высокотемпературного воздуха.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Измерения интенсивности излучения выполнены на ударной трубе УТС (рис.1) с внутренним диаметром 50 мм. Для откачки ударной трубы, вакуумного монохроматора и подводящих коммуникаций используются безмасляные вакуумные насосы (вакуумный пост Drytel 1025 фирмы Alcatel с предварительной откачкой насосом ISP-250C фирмы Anest Iwata). Запуск ударной волны осуществляется при воспламенении в камере высокого давления (КВД) стехиометрической смеси кислорода с водородом, разбавленной гелием (до 70%). Общее давление смеси в КВД составляло до 10 атм. Камера низкого давления (КНД) заполнялась исследуемым газом до давления 0.25, 1 или 5 Торр. Остаточное давление в КНД после откачки составляло 8×10^{-4} Торр.

Разрыв диафрагмы, разделяющей КВД и КНД, приводит к распространению ударной волны вдоль канала КНД. Скорость ударной волны V измерялась с помощью пьезодатчиков.

Две измерительные секции ударной трубы были использованы для регистрации излучения в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и в видимой области. Оптическая схема измерений для регистрации из-

лучения в области ВУФ в первой измерительной секции приведена на рис.2.

Вакуумный монохроматор ВМ-1 вместе с вакуумным каналом *b* соединялись с ударной трубой и откачивались безмасляным насосом. Ширина оптической щели 5 в стенке трубы составляла 0.3 мм, высота – 8 мм. Ширина входной щели монохроматора $S=0.1$ мм, высота $h=10$ мм. Источник калиброванного излучения 1 монтировался с другой стороны ударной трубы в откачиваемом объеме. В качестве такого источника использовалась дейтериевая лампа L879-01 фирмы Hamamatsu. Приемником излучения (позиция 9 на

рис.2) служила либо ПЗС-камера «Лева» для регистрации спектрального распределения излучения (панорамных спектров) в области 115–400 нм, либо фотоумножитель для регистрации временной эволюции излучения за фронтом ударной волны. В работе использовались фотоумножители фирмы Hamamatsu с чувствительностью в области $115 \div 320$ нм и в области $120 \div 180$ нм. Дифракционная решетка монохроматора 600 штр./мм (линейная дисперсия ~ 35 Å/мм) позволяла выделять узкие участки спектра (шириной ~ 1 нм) в областях длин волн, соответствующих атомарным линиям.

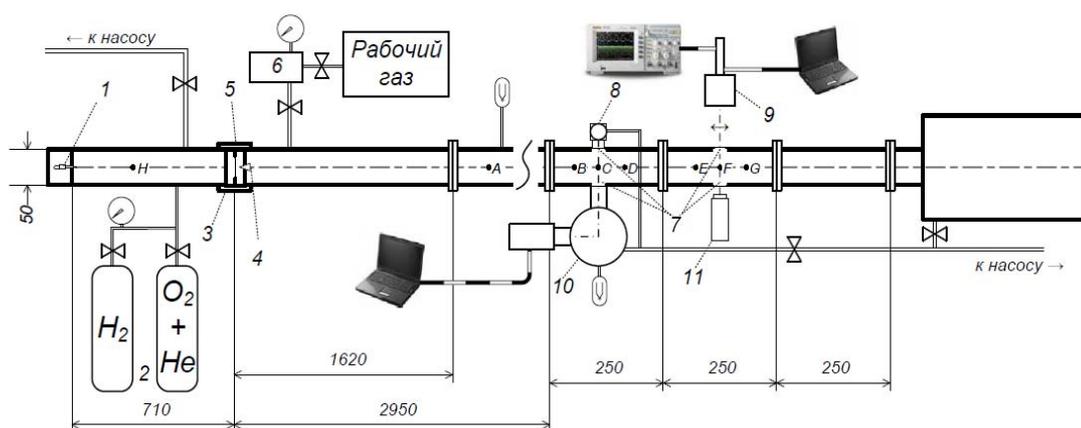


Рис. 1. Схема установки УТС: 1 – поджиг в камере высокого давления; 2 – баллоны с газом высокого давления; 3, 4, 5 – блок диафрагмы; 6 – система напуска рабочего газа; 7 – оптические окна; 8 – эталонная дейтериевая лампа; 9, 10 – спектральные приборы с системой регистрации (ФЭУ, ПЗС-камеры); 11 – лазер для юстировки. Положения датчиков давления обозначены буквами А, В, С, D, E, F, G

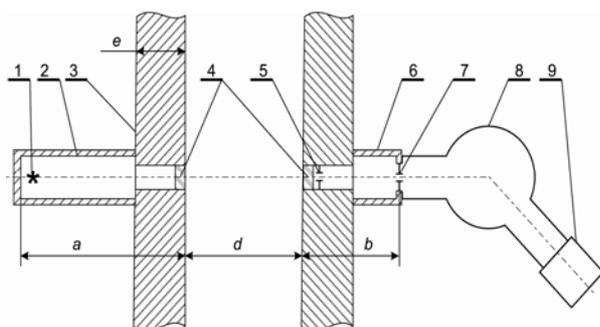


Рис. 2. Секция ударной трубы для регистрации излучения в области ВУФ. 1 – источник калиброванного излучения; 2, 6 – соединительные вакуумные каналы; 3 – корпус ударной трубы; 4 – окошки из MgF_2 ; 5 – оптическая щель на УТ; 7 – оптическая щель на входе монохроматора; 8 – вакуумный монохроматор ВМ-1; 9 – приемник излучения; $a=70$ мм, $b=210$ мм

Регистрация излучения в видимой и ближней ИК области выполнялась во второй измерительной секции с помощью монохроматора MOSA (позиция 9 на рис. 1) с набором решеток 150 и 300 штр./мм. Панорамные спектры в этом случае снимались с ПЗС-камерой МОРС-1/2048, выполненной на основе ПЗС-линейки типа ILX 511 фирмы Sony, с диапазоном спектральной чувствительности $360 \div 950$ нм. Временные распределения излучения за ударным фронтом

регистрировались фотоумножителем ФЭУ-77348 (Oriel Instruments) с чувствительностью в области $\lambda=200 \div 800$ нм. При калировке излучения в абсолютных единицах использовалась эталонная лампа СИРШ 8.5-200-1. Сигналы с фотоумножителей и пьезодатчиков регистрировались осциллографами Agilent DSO5014A и Agilent 54624A.

Скорость ударной волны определялась по сигналам от двух датчиков, расположенных на расстоянии 100 мм друг от друга симметрично по обе стороны от оси оптических измерений. Средний датчик находился посередине между ними в одном сечении с оптической осью системы регистрации излучения. В дальнейшем начало резкого роста сигнала от этого датчика было выбрано как реперная точка начала отсчета времени при регистрации эволюции излучения.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАНОРАМНЫХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЗДУХА

В экспериментах были зарегистрированы панорамные спектры излучения воздуха, т.е. распределения интенсивности излучения в определенных интервалах длин волн. Интенсивность излучения калибровалась в абсолютных энергетических единицах.

Калибровка спектральной чувствительности оптической системы проводилась методом сравнения со спектром калиброванного источника. Целью калибровки является получение калибровочной кривой

$f(\lambda)$ – зависимости чувствительности оптической системы от длины волны. Для сигнала $S(\lambda)$, измеряемого приемником излучения на выходе оптической системы, справедливо соотношение:

$$S(\lambda)[\text{отн.ед.}] = E(\lambda)[\text{абс.ед.}] \cdot f(\lambda),$$

где $E(\lambda)$ – энергия лучистого потока, поступившая на вход оптической системы от источника излучения за время проведения измерения, $f(\lambda)$ – функция, характеризующая чувствительность оптической системы.

Для определения чувствительности оптической системы, связанной с измерениями интенсивности излучения в видимой области, калиброванный источник излучения помещался в том же месте оптической схемы, где должен находиться источник исследуемого излучения, т.е. на месте снятой измерительной секции. Для области вакуумного ультрафиолета в связи с конструкцией оборудования, представленной на рис. 2, аналогичное расположение дейтериевой лампы было невозможно. Для учета различия в геометрии оптических схем калибровки и измерений были введены дополнительные корректирующие поправки при определении величины $f(\lambda)$.

В монохроматоре ВМ-1 фокусировка изображения на выходе осуществляется не на плоскости, а на участ-

ке сферы. В этом случае, при хорошей фокусировке изображения в центре плоской матрицы, изображение на ее краях при худшей фокусировке будет иметь, соответственно, худшее спектральное разрешение. Поэтому в экспериментах исследуемый спектральный интервал ограничивали центральной частью, а именно участком в 50 нм. При этом спектры снимали с шагом в 20 ÷ 30 нм (с переналожением). Следует отметить, что в данных экспериментах минимальное время экспозиции, которое можно было задать в программе, управляющей работой оптической камеры, составляло 10 мкс. Это время близко ко времени пролёта ударной волны мимо смотровых щелей на ударной трубе, поэтому в ходе таких экспериментов регистрировалась энергия излучения, суммированная за весь период существования высокотемпературного газа за ударной волной.

Модельная воздушная смесь состояла из 80 % N_2 и 20 % O_2 . Смесь газов готовилась в отдельном объеме заранее. Напуск газа в КНД осуществлялся через мерный объем (отношение к объему КНД 1:100). На рис. 3 приведены спектры излучения за ударной волной при начальном давлении в КНД $p_1 = 0.25$ Торр. Там же приведена расшифровка компонентов наблюдаемого спектра.

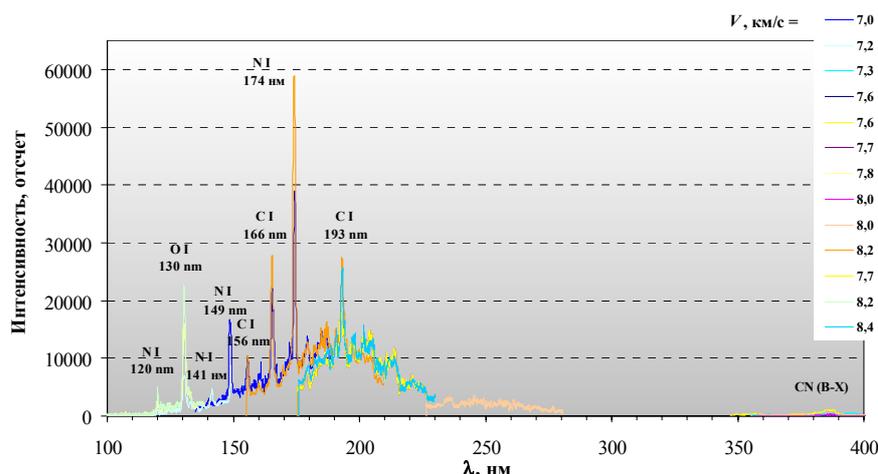


Рис. 3. Спектры излучения за ударной волной в воздушной смеси при начальном давлении в КНД $p_1 = 0.25$ Торр и скоростях волны 7÷8.4 м/с. Скорости указаны в правой части рисунка

На рис.3 видно, что в спектре излучения заметную интенсивность имеют линии атома азота: 120, 141, 149, 174 нм, резонансная линия атома кислорода 130 нм и три линии атома углерода 156, 166 и 193 нм. Присутствие в спектре воздушной смеси линий углерода может быть объяснено диффузией этого элемента со стенок ударной трубы. То же относится и к излучению CN в области 380-390 нм, образовавшегося благодаря примесям на стенках ударной трубы.

Как показано далее (раздел 4.1), длительность излучения воздуха τ_{eff} , регистрируемая при скоростях ударной волны 6.0 ÷ 8.5 км/с и давлении газа перед фронтом волны 0.25 Торр, не превышает 1 мкс (лабораторного времени). На этом основании, используя калибровочную функцию, а также взяв в качестве τ_{eff} величину, равную 1 мкс, получим регистрируемую ПЗС-камерой спектральную плотность излучения вы-

сокотемпературной воздушной смеси в абсолютных энергетических единицах Вт/см³·стер·мкм (рис.4, а, б). Температура газа T_0 , указанная в подписи к рисунку, является расчетной величиной, относящейся непосредственно к фронту ударной волны.

Сравнивая экспериментальные данные по плотности излучения ударной волны в разных спектральных диапазонах на рис.4, можно сделать вывод о значительном вкладе излучения в области ВУФ в общий радиационный поток.

Также видно, что в атомарных линиях азота (120, 141, 149, 174.5 нм) и кислорода (130 нм) интенсивность излучения существенно выше, чем в той части спектра, которую можно отнести к молекулярным полосам. Так, на длинах волн 180 ÷ 210 нм излучение, возможно, определяется несколькими УФ полосами молекул NO, образующихся в ударной волне. На участке 380 ÷ 395

нм излучение относится к суммарному излучению молекул CN в фиолетовой системе полос и ионов N_2^+ в первой отрицательной системе полос.

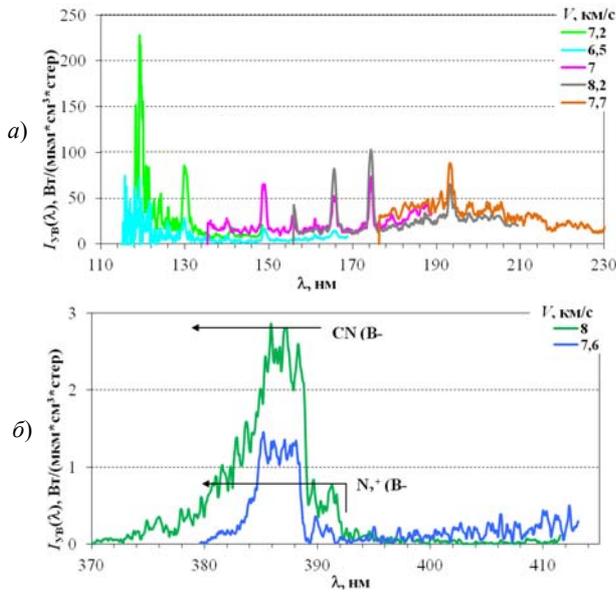


Рис. 4. Спектральная плотность излучения воздуха в диапазоне $\lambda=120 \div 230$ нм (а) и $\lambda=370 \div 415$ нм (б)

На наш взгляд, эти компоненты появляются в более поздние моменты времени (по отношению к фронту ударной волны) и потому относятся к более низким температурам, чем T_0 . Присутствие этого излучения в панорамном спектре определяется большим временем экспозиции ПЗС-камеры «Лега», захватывающим начало и конец всех физико-химических процессов в ударной волне.

Примеры спектров, снятых при разных скоростях ударных волн в воздухе (рис. 5), демонстрируют сильное увеличение интенсивности излучения с ростом скорости.

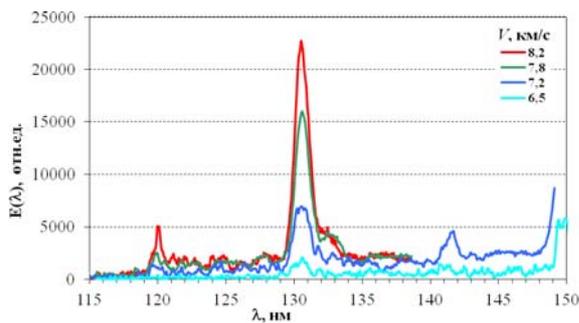


Рис. 5. Зависимость интенсивности наблюдаемого спектра $\lambda=115 \div 150$ нм, воздух, $p_1=0.25$ Торр, $V=6.5 \div 8.2$ км/с от скорости ударной волны (интенсивность приведена в относительных единицах)

4. ЭВОЛЮЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ И СМЕСЯХ O_2 И N_2 С АРГОНОМ

Эксперименты по исследованию временных характеристик излучения выполнялись на той же оптической установке для регистрации ВУФ, что и для панорамных спектров. В этом случае в качестве приемника излучения использовался фотоумножитель R-6836 с собственным временем реакции умножителя 20 нс. На

выходе монохроматора ВМ-1 монтировался узел с выходной щелью шириной 0.3 мм. Ширина входной щели в экспериментах составляла 0.1 мм. В этих условиях ширина регистрируемого спектрального диапазона равнялась 1 нм. Сопротивление нагрузки ФЭУ составляло 1 кОм, при этом постоянная времени измерительной цепи не превышала 3 нс. Сигнал с ФЭУ поступал на осциллограф Agilent DSO 5014А, имеющего полосу пропускания 100 мегагерц и минимальный интервал между точками измерения 2 нс.

Для калибровки излучения, регистрируемого фотоумножителем, в абсолютных энергетических единицах используется та же деутериевая лампа, что и при исследовании панорамных спектров. Геометрия оптической схемы калибровки не менялась. С помощью данных калибровочных измерений, выполненные с использованием ФЭУ в качестве приемника излучения, определялась калибровочная функция оптической установки. Предварительно также был получен график зависимости коэффициента усиления ФЭУ от напряжения питания.

Временные распределения интенсивности излучения за фронтом ударной волны были получены в нескольких смесях газов: воздух (80% N_2 + 20% O_2) при начальном давлении $p_1=0.25$ Торр, $V=6.98 \div 8.49$ км/с; смесь 10% воздух + 90% Ar, $p_1=0.25$ Торр; смесь 10% O_2 + 90% Ar, $p_1=1$ и 5 Торр; 10% N_2 + 90% Ar, $p_1=1$ и 5 Торр.

4.1. Воздух: 80% N_2 + 20% O_2 , $p_1=0.25$ Торр, $V=6.98 \div 8.49$ км/с

Наблюдаемая в воздухе длительность излучения при скоростях ударных волн, близких первой космической, не зависит от длины волны и составляет около 1 микросекунды (лабораторное время). На рис. 6 приведены осциллограммы излучения в линиях атомов O и N.

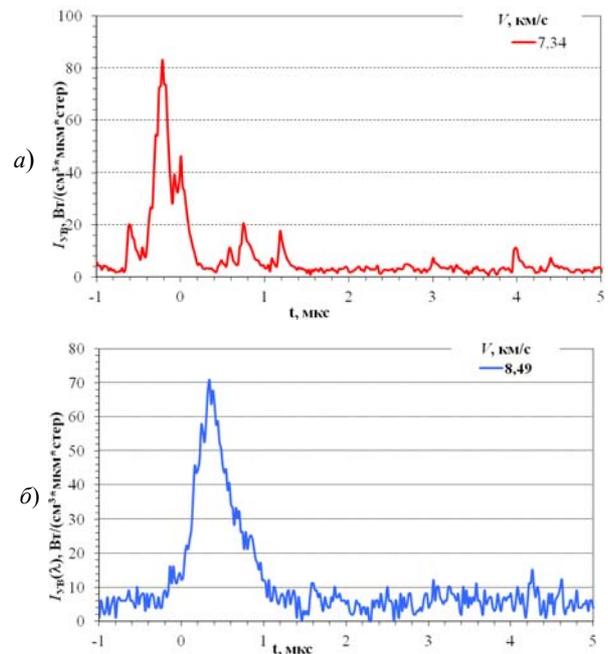


Рис. 6. Временная зависимость интенсивности излучения за фронтом ударной волны: (а) $\lambda=130$ нм, $V=7.34$ км/с; (б) $\lambda=149$ нм, $V=8.49$ км/с

Малая продолжительность области излучения связана с быстрым падением температуры в молекулярном газе из-за энергоемких процессов возбуждения

внутренних степеней свободы и диссоциации, вследствие чего падает скорость образования электронов и возбуждения атомов.

В таблице 1 представлены сравнительные данные по интенсивности излучения в различных участках спектра в воздухе. Величина I_{\max} (Вт/см³·мкм·стер) – это максимальная величина интенсивности излучения, зарегистрированная в эксперименте.

Таблица 1

Интенсивность излучения в абсолютных единицах. Смесь газов № 1: 80% N₂ + 20% O₂; № 2: (8% N₂ + 2% O₂) + 90% Ar; давление $p_1 = 0.25$ Торр

Смесь газов	λ , нм	V , км/с	I_{\max}	T_0 , К
№ 1	130	7.34	80	25800
	141	7.07	9	24200
	141	7.50	18	26800
	149	8.49	70	34200
	214	8.22	11	32400
	226	7.7	10	28300
	226	7.9	6	29800
	294	6.29	1.4	19400
№ 2	294	8.3	1.3	32900
	124	6.22	240	32300
	174.5	6.57	13	36000

4.2. Воздух с аргоном: 8% N₂ + 2% O₂ + 90% Ar, $p_1 = 0.25$ Торр, $V = 5.99 \div 7.05$ км/с

Исследование временного распределения излучения в ударной волне в смеси воздуха с аргоном не носило систематического характера. Осциллограммы излучения были получены при нескольких скоростях ударной волны, при температурах T_0 более высоких, чем в неразбавленном воздухе. Интенсивность излучения была представлена в относительных единицах. На рис.7 приведены осциллограммы излучения, полученные в разных спектральных областях – ВУФ и видимой.

На рис.7а представлены осциллограммы, полученные при двух значениях скорости. Видна эволюция излучения, интегрального по интервалу $\Delta\lambda = 120-180$ нм, с наличием двух последовательных пиков на каждой из осциллограмм. Эти осциллограммы получены при работе с нулевым порядком решетки монохроматора. Более длинноволновая область не регистрировалась благодаря резкому падению чувствительности используемого фотоумножителя на длине волны более 180 нм. Поскольку к приведенному на рис. 7а спектральному интервалу относятся все указанные выше атомарные линии азота и кислорода, то естественно связать первый пик с атомарной и электронной кинетикой. Второй пик, с учетом более высоких температур в экспериментах с аргоном, вполне возможно, определяется образованием и возбуждением атомарных ионов O⁺ и N⁺ и их излучением. Видно, что на осциллограмме, полученной при более высокой скорости, второй пик начинается раньше и интенсивность его выше.

На рис.7б излучение соответствует суммарному по спектральной области $\Delta\lambda = 200-900$ нм. Эти данные были получены на второй измерительной секции, оборудованной монохроматором для видимого диапазона

спектра. Спектральный прибор работал в нулевом порядке дифракционной решетки вместе с фотоумножителем, чувствительным к видимой и ближней ИК области. Временная зависимость излучения не имеет особенностей, подобных рис. 7а. Вместе с тем, видно, что, как и в области ВУФ, интенсивность излучения увеличивается с ростом скорости и температуры газа.

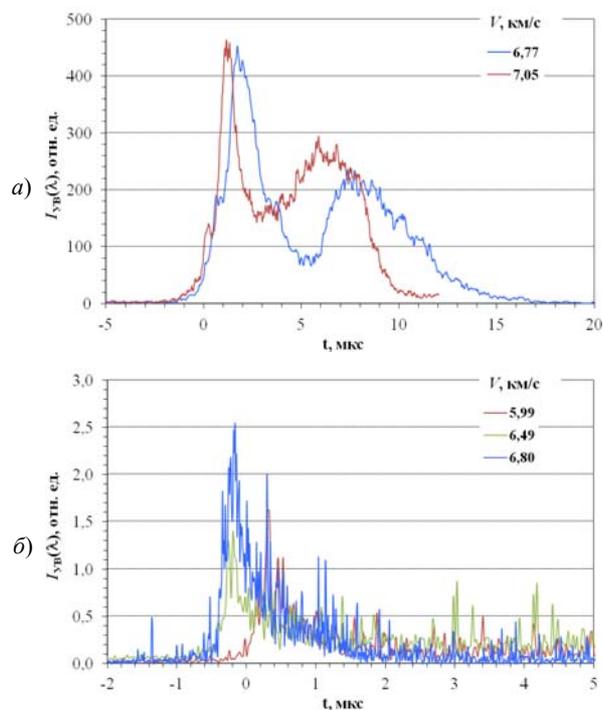


Рис. 7. Временная эволюция излучения за фронтом ударной волны в смеси газов 10% воздух + 90% аргон, $p_1 = 0.25$ Торр. а) Интегральное излучение в области $\Delta\lambda = 120 \div 180$ нм, $T_0 = 38400; 42000$ К при $V = 6.77; 7.05$ км/с. б) Интегральное излучение в области $\Delta\lambda = 200 \div 900$ нм, $T_0 = 38800$ К при $V = 6.8$ км/с

Временные зависимости излучения на узких спектральных участках для длин волн 124 и 174.4 нм, полученные в этой смеси газов также при повышенных температурах, имеют достаточно сложную временную структуру, требующую своей дальнейшей расшифровки. Продолжительность излучения в смеси воздуха с аргоном оказывается существенно больше, чем в неразбавленном воздухе. Этот факт можно интерпретировать с точки зрения поддержания высокой температуры в ударной волне в течение большего времени, чем в воздухе, за счет присутствия аргона. Вследствие этого дольше поддерживаются процессы электронного возбуждения компонентов смеси, прежде всего, атомов.

4.3. Смеси 10 % O₂ + 90% Ar и 10% N₂ + 90% Ar, $p_1 = 1$ и 5 Торр, $V = 4.67 \div 6.3$ км/с

Интерпретация экспериментов в воздушной смеси довольно сложна с точки зрения кинетики физико-химических процессов. Для уменьшения компонентного состава плазмы в ударной волне были выполнены эксперименты по измерению временных распределений излучения в ударной волне в смесях кислорода с аргоном и азота с аргоном. На осциллограммах рис.8 и 9

видно, что, несмотря на различие в скорости ударной волны и начальном давлении, наблюдаемое излучение намного продолжительнее, чем в неразбавленном воздухе при скоростях $7 \div 8.5$ км/с. Как и в предыдущем разделе, этот факт, по-видимому, можно объяснить более длительным поддержанием высокой температуры за фронтом ударной волны в смесях, богатых аргоном.

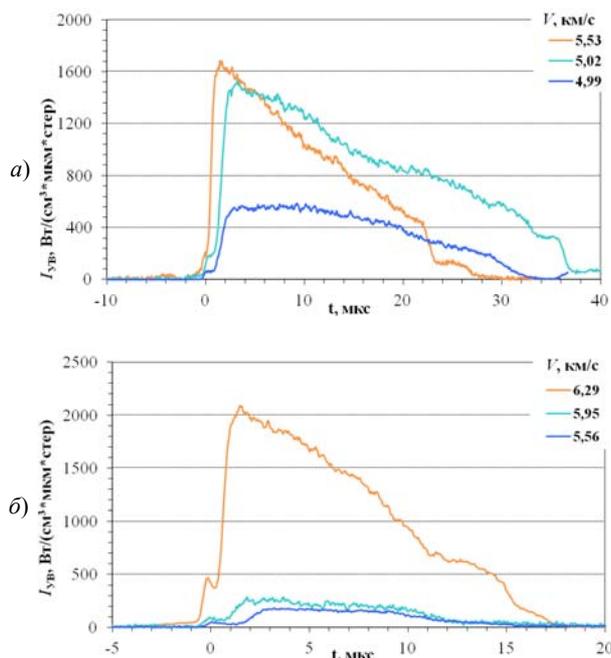


Рис. 8. Излучение на длине волны 149 нм (линия атома N). Смесь 10% N₂ + 90% Ar. а) p₁ = 5 Торр, V = 4.99 ÷ 5.53 км/с, T₀ = 21140 ÷ 26200 К. б) p₁ = 1 Торр, V = 5.56 ÷ 6.29 км/с, T₀ = 26320 ÷ 33930 К

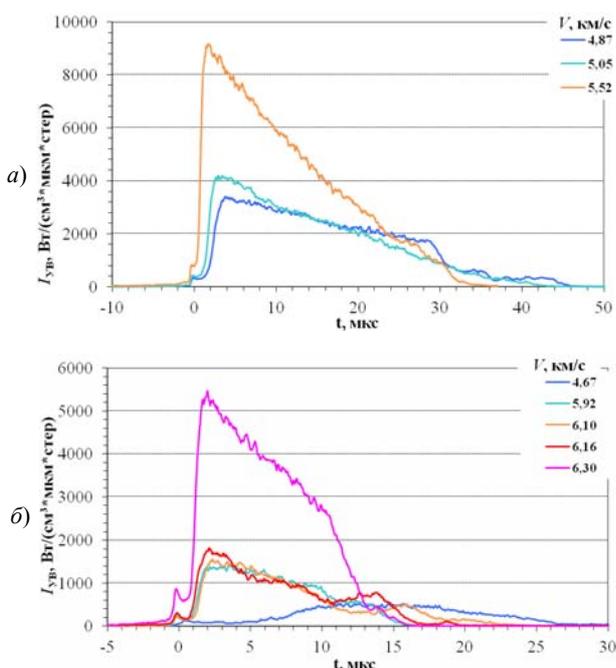


Рис. 9. Излучение на длине волны 130 нм (резонансная линия атома O). Смесь 10% O₂ + 90% Ar. а) p₁ = 5 Торр, V = 4.87 ÷ 5.52 км/с, T₀ = 20600 ÷ 26320 К. б) p₁ = 1 Торр, V = 4.67 ÷ 6.3 км/с, T₀ = 18840 ÷ 34120 К

В таблице 2, по аналогии с таблицей 1, представлены величины I_{max} (Вт/см³·мкм·стер) – максимальные значения интенсивности излучения, зарегистрированные в эксперименте, в зависимости от спектрального участка, на котором регистрируется излучение, и скорости ударной волны. Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что при более высоких температурах и более высоких давлениях для смесей с аргоном интенсивность в максимуме излучения I_{max} (особенно в линиях атомов) на порядки превышает величины I_{max}, получаемые в неразбавленном воздухе. Эти данные также наглядно демонстрируют, что излучение в ВУФ области имеет достаточно высокую мощность.

Таблица 2

Интенсивность излучения в абсолютных единицах. Смесь № 1: 10% O₂ + 90% Ar; смесь № 2: 10% N₂ + 90% Ar

Смесь газов	λ, нм	p ₁ , Торр	V, км/с	I _{max}	T ₀ , К
№ 1	120	5	4.99	110	20990
	130	5	4.87	3500	20600
	130	5	5.52	9000	26320
	130	1	4.67	500	18840
	130	1	5.92	1200	30270
	130	1	6.3	5200	34120
№ 2	130	5	4.91	20-25	20470
	140	5	5.01	20	21440
	149	5	4.96	580	20760
	149	5	5.48	1600	25900
	141	1	6.15	140	32210
	149	1	6.29	2100	33930
	174.5	1	5.86	130	29110

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены количественные данные об интенсивности и временной эволюции излучения воздуха и смесей воздуха, кислорода и азота с аргоном за фронтом ударных волн в спектральном диапазоне 120 ÷ 400 нм при температурах 20 ÷ 34 тысяч градусов. Сравнение интенсивности излучения в коротковолновом диапазоне спектра (120 ÷ 230 нм) с излучением в области 230 ÷ 900 нм указывает на существенно большую мощность радиационного потока в коротковолновом диапазоне во всём исследованном интервале температур. При этом наблюдается сильная зависимость интенсивности излучения от скорости ударных волн, а, следовательно, от температуры за фронтом ударной волны.

Показано, что во всём спектральном диапазоне наблюдаемая длительность излучения за ударной волной в воздухе при скоростях 6.3 ÷ 8.4 км/с и давлении перед фронтом волны 0.25 Торр составляет около 1 микросекунды. Вместе с тем, излучение газов, разбавленных на 90% аргоном, длится не менее, чем на порядок больше, что, по-видимому, связано с более длительным пребыванием газа в высокотемпературной аргоновой «бане» за фронтом ударной волны.

Интенсивность излучения в атомарных линиях N и O с λ=120, 130, 141, 149 нм существенно выше, чем излучение «фона», которое можно отнести к излучению в более слабых линиях атомов или атомарных ионов.

Заметим, что измеренная интенсивность излучения характеризует энергию, зарегистрированную за так называемое лабораторное время, т.е. время пролёта ударной волны мимо смотровых окон на ударной трубе. Но, в соответствии с законом сохранения массы, газ, сжатый за ударным скачком, удаляется от фронта волны медленнее, чем движется фронт, пропорционально величине скачка плотности. В условиях настоящей работы, когда излучает диссоциированный возбуждённый газ, скачок плотности может достигать 10-кратной величины. Во столько же раз дольше газ будет удаляться от фронта волны на расстояние, которое ударный фронт пройдет за единицу времени. Соответственно, во столько же раз следует уменьшить и приведенную на рис. 4 спектральную плотность излучения газа, если относить ее ко времени пребывания газа за фронтом волны, а не ко времени движения фронта. В нашем случае эта величина является величиной приближенной, поскольку скорость, плотность и, следовательно, время пребывания газа за фронтом являются величинами переменными и требующими более точного расчета параметров потока.

Представленные результаты являются основой для анализа кинетических процессов в воздухе при температурах $30 \div 50$ тысяч градусов и базой для получения надежных кинетических коэффициентов этих процессов, взамен используемых в настоящее время моделей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- V – скорость ударной волны, км/с;
 p_1 – начальное давление газа в камере низкого давления (перед фронтом ударной волны), Торр;
 T_0 – температура газа непосредственно во фронте ударной волны (в работе рассчитывается), К;
 I_{\max} – максимальная интенсивность излучения на осциллограмме, Вт/см²·мкм·стер;
 λ – длина волны светового потока, регистрируемого в эксперименте, нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grinstead J.H., Wilder M.C., Olejniczak J., Bogdanoff D.W., Allen G.A., Dang K., and Forrest M.J. Shock-heated air radiation measurements at lunar return conditions. // AIAA Paper N 2008-1244.
2. Cruden B.A., Martinez R., Grinstead J.H., and Olejniczak J. Simultaneous vacuum ultraviolet through near IR absolute radiation measurement with spatiotemporal resolution in electric arc shock tube. // AIAA Paper N 2009-4240.
3. Johnston C.O. A comparison of EAST shock-tube radiation measurements with a new air radiation model. // AIAA Paper N 2008-1245.
4. Shang J., Surzhikov S. Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation. // Progress in aerospace science, 2012, V.53, Pp.46–65.
5. Brandis A.M., Johnston C., Cruden B., Bose D. Validation of high speed Earth atmospheric entry radiative heating from 9.5 to 15.5 km/s. // AIAA Paper N 2012-2865.
6. Surzhikov S. Coupled gasdynamic interaction in nonequilibrium dissociation for large-scale returned space vehicles. // Chem. Phys., 2012, V.398, Pp.56–63.
7. Суржигов С.Т., Шувалов М.П. Тестирование расчетных данных по конвективному и радиационному нагреву спускаемых космических аппаратов нового поколения. // ТВТ, 2013, Т.51, № 1, С. 456–470.

8. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Исследование временных характеристик излучения ударно-нагретого воздуха. // Школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», ИПМех РАН, 3–4 декабря 2013 г.