

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 533.9 : 533.08

### РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВ ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2021 г. П. В. Козлов<sup>1</sup>, И. Е. Забелинский<sup>1</sup>, Н. Г. Быкова<sup>1</sup>, Ю. В. Акимов<sup>1</sup>,  
В. Ю. Левашов<sup>1\*</sup>, Г. Я. Герасимов<sup>1</sup>, А. М. Тереза<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vyl69@mail.ru; levashovvy@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021;

после доработки 19.02.2021;

принята в печать 22.02.2021

Представлена методика калибровки системы регистрации излучения газов за фронтом ударной волны на экспериментальном комплексе “Ударная труба” НИИ механики МГУ в спектральном диапазоне 190–1100 нм. Основное внимание уделяется вопросу получения измеряемых величин в абсолютных единицах. Описана процедура калибровки измерительной системы при помощи эталонных источников излучения. Показано, что только совместное использование данных панорамного спектра с результатами временных эволюций излучения в узком спектральном диапазоне позволяет получить корректную информацию о плотности мощности излучения компонент плазмы в ударной волне.

*Ключевые слова:* ударные волны, излучение газов, калибровка оптической системы, спектроскопия атомов и молекул, вакуумное ультрафиолетовое излучение, видимая область спектра.

DOI: 10.31857/S0207401X21080069

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов в газах, нагретых до высоких температур, неразрывно связано с развитием методов исследования быстропротекающих процессов, в том числе спектроскопических методов исследований [1–3]. Изучение спектрального распределения и его временной эволюции может дать интересную информацию о различных процессах, протекающих в газе [2, 4–8]. Измерение этих характеристик с высокой разрешающей способностью (до 10 нс в экспериментах по измерению временной эволюции) позволяет разделять стадийное поведение происходящих процессов [9]. При этом можно детально исследовать как равновесную, так и неравновесную область такого рода процессов. Уникальным инструментом для изучения высокотемпературных процессов в плазме при высоких температурах (более 50 000 градусов) в различных газах (воздух, кислород, азот, окись азота, аргон, углекислый газ, окись углерода) является ударная труба [4, 10, 11].

Важность исследования процессов в высокотемпературных газовых средах связана с развитием космической техники, освоением космического пространства, разработкой летательных аппаратов,

движущихся в атмосфере планет с высокими скоростями. Обтекание космического аппарата при движении в воздухе с высокими скоростями сопровождается образованием вокруг него низкотемпературной плазмы, где могут протекать сложные физико-химические процессы. К данным процессам можно отнести обмен энергией между поступательной, вращательной, колебательной и электронной степенями свободы, газофазные и гетерогенные химические реакции, вдув продуктов разрушения теплозащитного покрытия, излучение. Для описания такого рода явлений необходимы разработка соответствующих моделей и методик, подбор параметров моделей, а также их валидация. Помимо процессов, указанных выше, необходимо отметить, что увеличение скорости набегающего потока приводит к увеличению радиационной составляющей теплового потока к поверхности аппарата [12–15].

Регистрация панорамных спектров излучения ударных волн в видимом и ультрафиолетовом диапазонах в настоящее время осуществляется с помощью спектрометров, использующих в качестве приемного устройства приборы с зарядовой связью (ПЗС) или приборы с зарядовой связью с электрооптическим преобразователем (ПЗС с ЭОП).

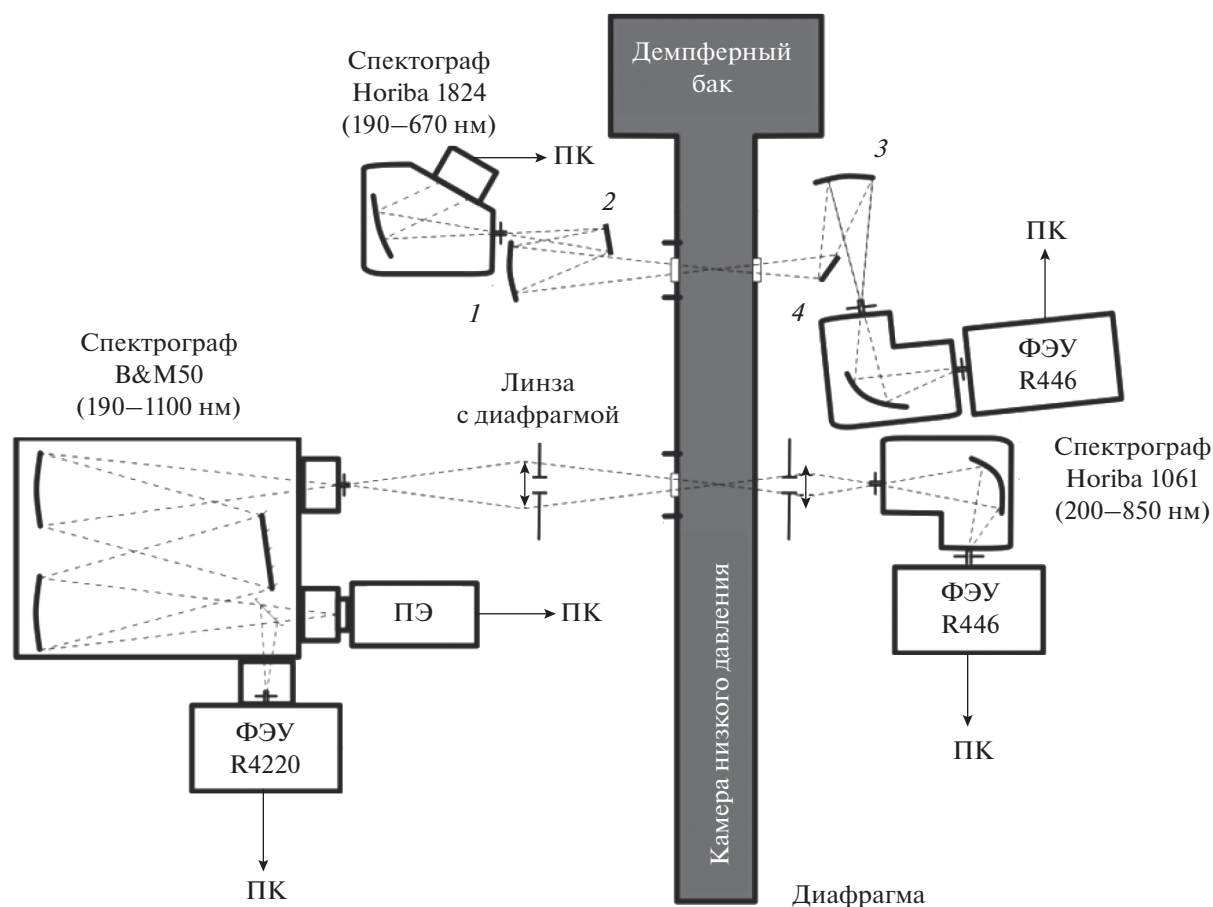


Рис. 1. Схема системы регистрации ударной трубы: 1–4 – зеркала, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ПК – персональный компьютер, ПЭ – прибор с зарядовой связью с электрооптическим преобразователем.

В настоящей работе представлена методика регистрации интегрального распределения интенсивности излучения ударной волны в широком спектральном диапазоне: 190–1100 нм. При этом основное внимание при описании методики уделяется вопросу получения данных в абсолютных единицах.

### МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНО-НАГРЕТЫХ ГАЗОВ

Система регистрации экспериментального комплекса “Ударная труба” НИИ механики МГУ [16] позволяет регистрировать как интегральное (суммарное) излучение ударной волны, проходящей мимо измерительного сечения, так и наблюдать эволюцию во времени излучения на узком участке спектра с высоким временным и спектральным разрешением. Диапазон регистрируемого излучения находится в интервале длин волн от 190 до 1100 нм.

При регистрации панорамного спектра излучения ударной волны обычно используются спектрометры, в которых в качестве приемника излучения служат ПЗС-линейки или матрицы. В настоящее время минимальное время экспозиции, реализуемое на таких устройствах, больше времени прохождения ударной волны в измерительном сечении (особенно при высоких скоростях ударной волны), а следовательно, регистрируемое ими излучение представляет собой интегральный по времени спектр. Регистрация временной эволюции излучения возможна только с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), обеспечивающих достаточную чувствительность при высоком временном разрешении. Обычно с помощью ФЭУ исследуют временные изменения излучения в узком спектральном диапазоне, который выделяют с помощью монохроматора. Схема системы регистрации представлена на рис. 1.

Для получения значений интенсивности в абсолютных единицах необходимо провести процедуру предварительной калибровки регистрирующей

системы. На рис. 2 приведена эквивалентная оптическая схема измерения. В такой схеме изображение источника излучения на входной щели спектрометра строится в масштабе 1 : 1.

Калибровка ПЗС-приемника и ФЭУ в видимом и ультрафиолетовом диапазонах 190–1100 нм осуществляется с помощью вторичных эталонов энергетической яркости, в качестве которых используются лампы с вольфрамовой нитью накала (вольфрамовая лампа) и дейтериевая лампа. В вольфрамовых лампах СИРШ-8 и СИ-10 нить накала имеет ширину 2 и 3 мм и высоту 10 и 20 мм соответственно.

Вольфрамовые лампы проходят периодическую поверку на спектральную энергетическую яркость (СПЭЯ) или на яркостную температуру [17] в институте службы метрологии. Она представляет собой мощность, излучаемую источником по нормали к поверхности с единицы площади в единичный телесный угол в единичном спектральном диапазоне. В системе СИ СПЭЯ выражается в Вт/м<sup>3</sup>·ср, но более понятными единицами измерения являются Вт/см<sup>2</sup>·ср·мкм. При калибровке лампы на СПЭЯ определяется яркость излучения на нескольких длинах волн при заданной величине тока накала.

Возможна также калибровка эталонной лампы на величину яркостной температуры, в результате которой выдается сертификат на соответствие набора значений яркостных температур набору величин тока накала. Яркостную температуру определяют на определенной длине волны (обычно  $\lambda = 659$  нм). Неудобство данного метода калибровки вольфрамовых ламп состоит в том, что для получения СПЭЯ нужно провести определенные расчеты. Для этого на первом этапе необходимо установить соответствие яркостной температуры  $T_{я}$  истинной температуре  $T$  вольфрама с учетом зависимости степени черноты вольфрама,  $\varepsilon$ , от длины волны  $\lambda$  и истинной температуры:  $\varepsilon(\lambda, T)$ . Для этих целей используется следующее соотношение [18]:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{я}} = \frac{\lambda k}{ch} \ln(\varepsilon(\lambda, T)), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $k$  – постоянная Больцмана,  $c$  – скорость света,  $h$  – постоянная Планка. Результаты таких расчетов на длине волны  $\lambda = 659$  нм представлены в табл. 1.

Далее для любого значения яркостной температуры спектральная энергетическая яркость вольфрамовой лампы рассчитывается с использованием формулы Планка с учетом степени черноты вольфрама  $\varepsilon(\lambda, T)$ :

$$b_{\lambda} = \varepsilon(\lambda, T) \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (2)$$

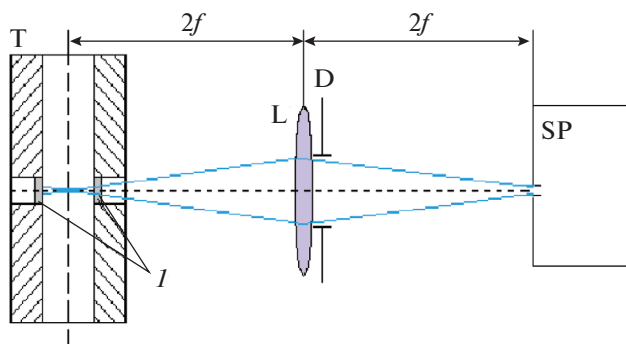


Рис. 2. Эквивалентная оптическая схема измерения излучения ударной волны: Т – сечение ударной трубы, L – линза с фокусным расстоянием  $f$ , D – ограничивающая диафрагма, SP – спектрометр, I – кварцевые окошки в измерительной секции.

На рис. 3а приведен пример СПЭЯ вольфрамовой лампы для яркостной температуры, равной 2200 °С. Как видно из этого рисунка, использование вольфрамовых ламп в качестве эталонного источника имеет некоторые ограничения. Поскольку излучение вольфрама с падением температуры ниже 3000 К резко падает на длинах волн ниже 400 нм (рис. 3а), то использование вольфрамовых ламп ограничено диапазоном длин волн не ниже 300 нм (т.е.  $\lambda \geq 300$  нм). Для калибровки оптических систем в диапазоне  $\lambda < 300$  нм используют дейтериевую лампу [19].

Спектр излучения дейтериевой лампы в относительных единицах представлен на рис. 3б. Абсолютное значение СПЭЯ дейтериевой лампы получают путем сравнения ее излучения с излучением вольфрамовой лампы в общем спектральном диапазоне (300–400 нм). В результате такого сравнения может быть получен коэффициент пе-

Таблица 1. Значения истинной температуры ( $T$ ) для различных яркостных температур ( $T_{я}$ )

$T_{я}, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$\delta T, \text{K}$
1200	1550	$\pm 2$
1300	1661	$\pm 2$
1400	1774	$\pm 2$
1500	1887	$\pm 2$
1600	2002	$\pm 2$
1700	2117	$\pm 2$
1800	2234	$\pm 2$
1900	2351	$\pm 3$
2000	2470	$\pm 3$
2100	2590	$\pm 3$
2200	2712	$\pm 4$
2300	2834	$\pm 4$

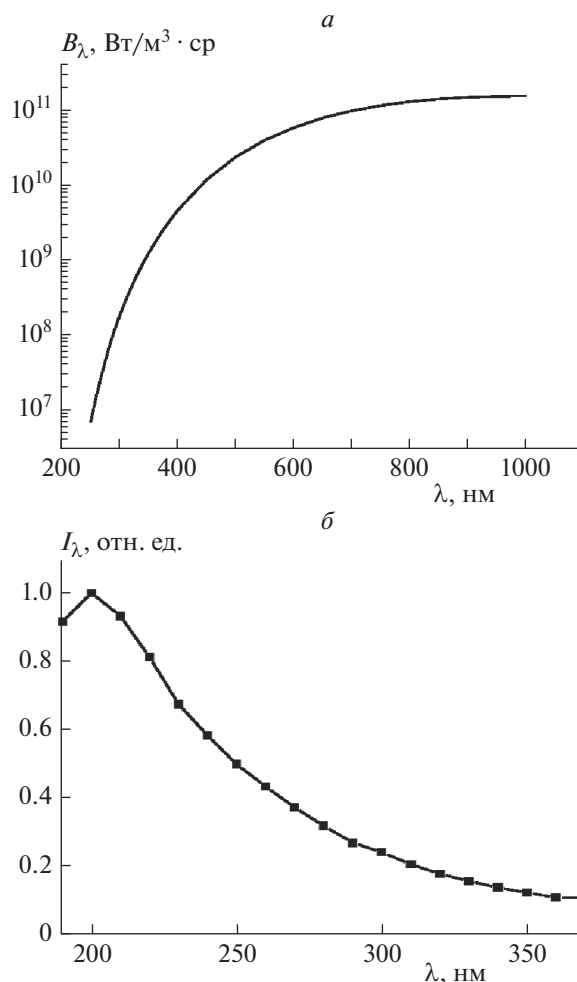


Рис. 3. Спектральные плотности энергетической яркости лампы СИ-10 для яркостной температуры 2200 °С (а) и лампы ДДС-30 (б).

решета, который далее применяется в более коротковолновом диапазоне.

После того как определены СПЭЯ эталонных источников, осуществляется калибровка измерительной (оптической) схемы эксперимента. Эксперимент калибровки состоит в том, что в измерительную схему на место исследуемого источника помещается эталонный источник излучения. В комплексе “Ударная труба” используется схема измерения, приведенная на рис. 2. В этой схеме источник излучения располагается на расстоянии  $2f$  от фокусирующей линзы, которая, в свою очередь, отстоит на расстоянии  $2f$  от входной щели спектрометра; таким образом, коэффициент увеличения схемы равен единице.

В эксперименте по калибровке оптической схемы энергия от эталонного источника ( $P_{\text{эт}}(\lambda)$ ), поступающая на приемник за время экспозиции ( $\tau_{\text{калибр}}$ ), может быть рассчитана следующим образом:

$$P_{\text{эт}}(\lambda) = b_{\lambda} \tau_{\text{калибр}} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{ср}} \right]. \quad (3)$$

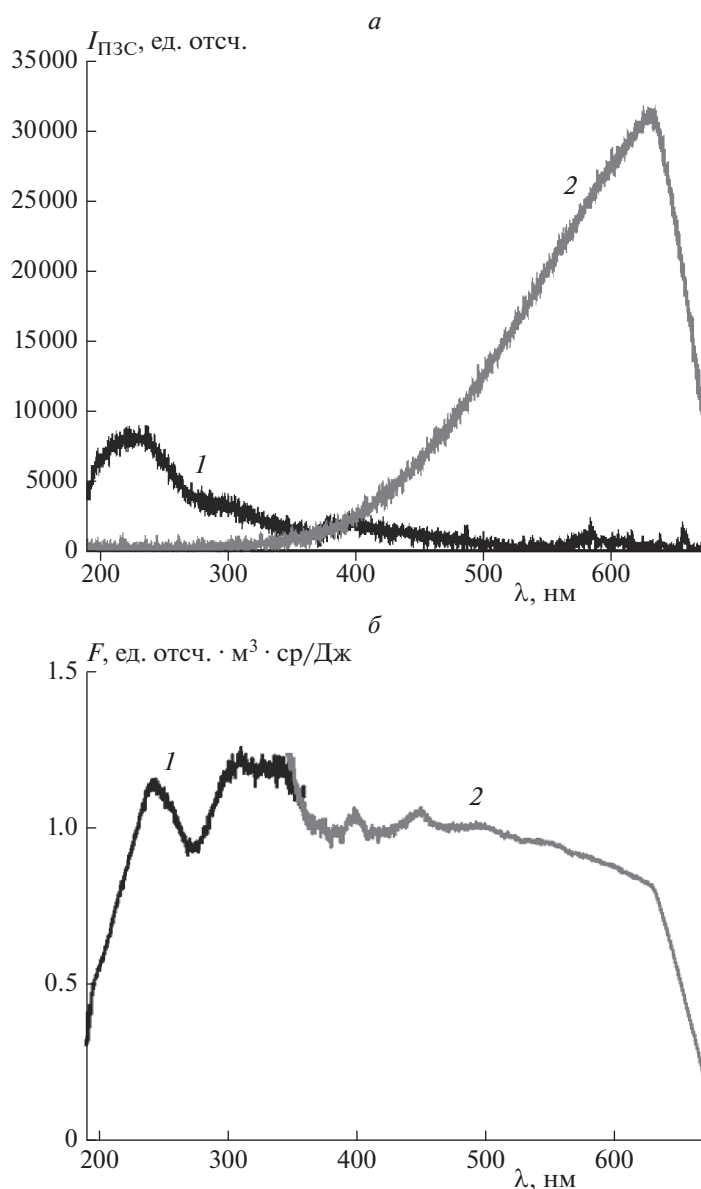
В то же время приемник излучения измеряет эту величину в условных единицах ( $I_{\text{ПЗС}}(\lambda)$ , ед. отсч.). Пример спектров излучения вольфрамовой лампы СИ-10 и дейтериевой лампы ДДС-30, зарегистрированных за время экспозиции 10 мкс приемником излучения, представлен на рис. 4а.

Функция чувствительности оптической схемы  $F(\lambda)$  определяется как отношение измеренного приемником сигнала, ( $I_{\text{ПЗС}}(\lambda)$  [ед. отсч.]), к энергии эталонного источника,  $P_{\text{эт}}(\lambda)$ :

$$F(\lambda) = \frac{I_{\text{ПЗС}}(\lambda)}{P_{\text{эт}}(\lambda)} \left[ \frac{\text{ед.отсч.} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{ср}}{\text{Дж}} \right]. \quad (4)$$

Пример функции чувствительности  $F(\lambda)$  в интервале длин волн 200–600 нм представлен на рис. 4б.

В эксперименте с ударной волной наблюдаемый в условных единицах  $I_{\text{ПЗС}}^{\text{УВ}}(\lambda)$  спектр излуче-



**Рис. 4.** Спектры излучения эталонных источников, зарегистрированные спектрометром Horiba SP140-1824, при времени экспозиции 10 мкс (*a*) и функция чувствительности оптической схемы (*б*); 1 – дейтериевая лампа ДДС-30, 2 – вольфрамовая лампа СИ-10.

ния переводится в абсолютные энергетические единицы путем деления его интенсивности на функцию чувствительности  $F(\lambda)$ :

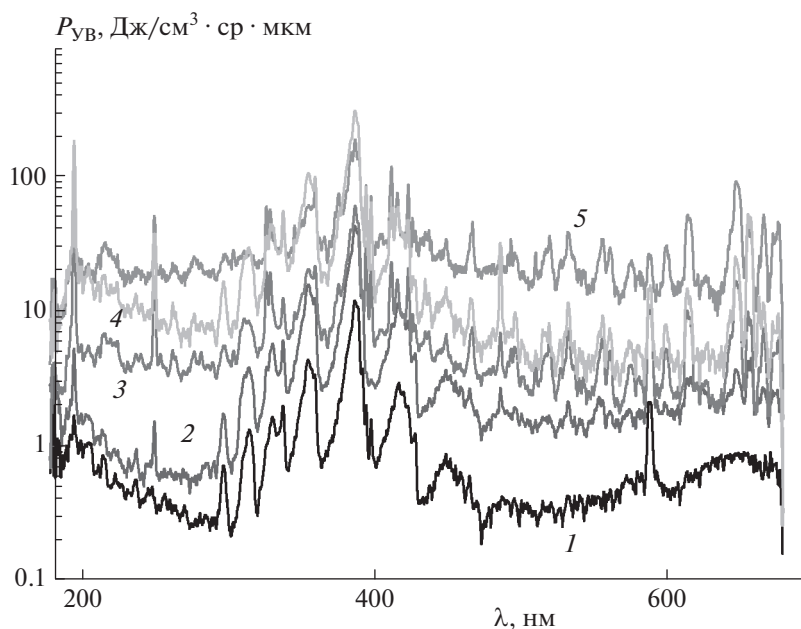
$$P_{\text{УВ}} = I_{\text{ПЗС}}^{\text{УВ}} / F(\lambda) = P_{\text{ЭТ}} I_{\text{ПЗС}}^{\text{УВ}} / I_{\text{ПЗС}} \quad (5)$$

Переход к единицам объемной плотности энергии излучения осуществляется путем деления  $P_{\text{УВ}}$  на диаметр ударной трубы в предположении, что ударная волна вдоль оптической оси наблюдения однородна.

Пример спектра излучения воздуха в абсолютных единицах для различных скоростей ударной волны представлен на рис. 5. Данный рисунок по-

лучен с использованием методики, представленной выше.

Необходимо отметить, что вид наблюдаемого спектра, а именно соотношение между максимальными значениями различных компонент спектра, зависит в том числе и от ширины аппаратной функции спектрометра. Особенно сильно такая зависимость проявляется при регистрации линейчатого спектра излучения атомов в силу того, что ширина аппаратной функции спектрометра обычно значительно превышает физическую ширину атомарной линии излучения. В значительно меньшей степени это проявляется при ре-



**Рис. 5.** Спектральная плотность энергии излучения ударной волны в воздухе при начальном давлении  $P_1 = 0.25$  Торр и различных скоростях ударной волны  $V_{SH}$ , км/с: 1 – 7.7, 2 – 9.1, 3 – 10.0, 4 – 10.6, 5 – 11.4.

гистрации молекулярных полос излучения и не имеет никакого влияния на плавно меняющуюся при изменении длины волны фоновую составляющую спектра.

Для перехода к объемной мощности излучения ударной волны необходимо учитывать тот факт, что в эксперименте время экспозиции спектрометра значительно превышает время излучения ударной волны, поэтому для корректного определения мощности излучения необходимы исследования временных характеристик излучения с достаточным (наносекундным) разрешением.

Проведение таких исследований возможно только на отдельных длинах волн с использованием ФЭУ в качестве приемника излучения. Излучение на определенной длине волны выделяют с помощью монохроматора. В экспериментах на установке “Ударная труба” возможно получение в одном эксперименте данных о временной эволюции излучения на трех длинах волн, а также панорамного спектра.

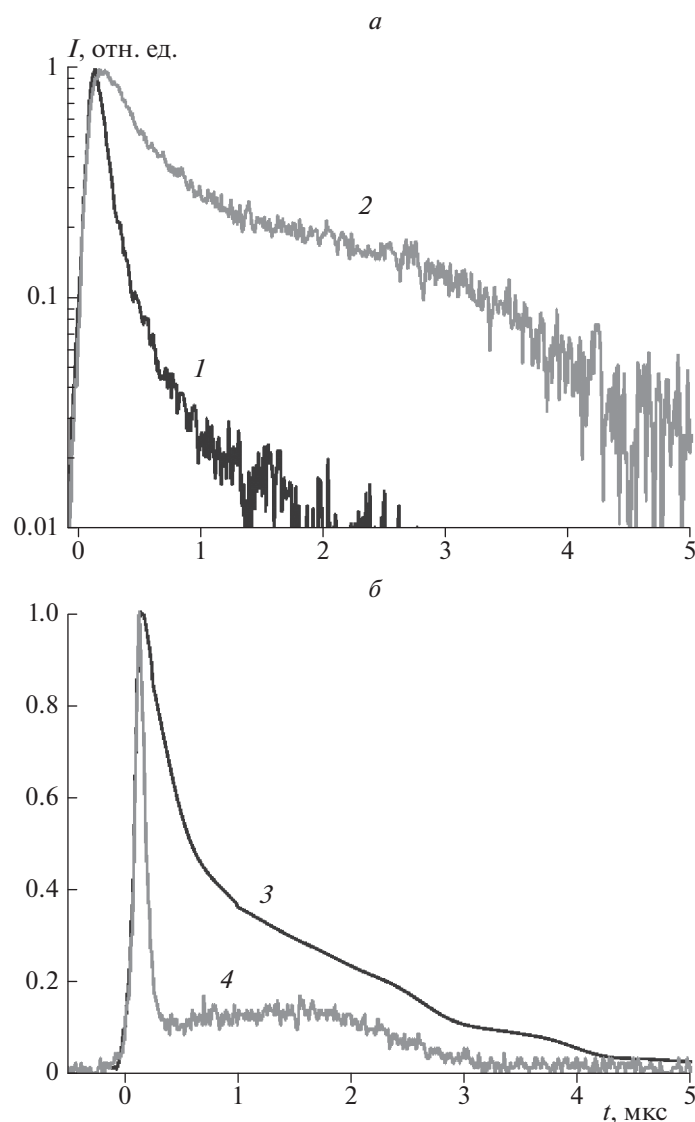
На рис. 6 приведены осциллограммы излучения ударной волны в воздухе для двух ее скоростей: 8.22 и 10 км/с, на нескольких длинах волн – 213, 391 и 420 нм, принадлежащих излучению разных компонент плазмы. Данные зарегистрированы с помощью монохроматора Horiba 1061 и ФЭУ R446 (Hamamatsu) в качестве приемника излучения. Для определения эффективного времени излучения ударной волны в выделенном узком диапазоне спектра ( $\Delta\tau$ ) используется следующий подход.

Временную осциллограмму излучения, наблюдаемую в эксперименте, заменяют равным ей по площади прямоугольником, высота которого равна значению мощности излучения в максимуме. При этом ширина прямоугольника равна эффективному времени излучения ударной волны.

Из данных, представленных на рис. 6, следует, что для ударной волны в воздухе время  $\Delta\tau$  для разных компонент плазмы и разных скоростей волны изменяется от 0.24 до 1.7 мкс. Таким образом, использование одного значения времени излучения  $\Delta\tau$  для всего спектрального диапазона может приводить к некорректным данным по мощности излучения. Именно совместное использование данных панорамного спектра с результатами временных исследований может дать правильную информацию о плотности мощности излучения различных компонент плазмы ударной волны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана методика регистрации излучения ударно-нагретого высокотемпературного газа. Для получения экспериментальной информации в абсолютных единицах необходима предварительная калибровка измерительной системы. Для рассматриваемого в работе диапазона длин волн (190–1100 нм) в качестве эталонного источника излучения используются вольфрамовые и дейтериевые лампы. Отмечается, что при экспериментальном определении объемной мощности излучения необходимо учитывать тот факт, что



**Рис. 6.** Временные нормированные профили излучения ударно-нагретого воздуха: *a* –  $V_{УВ} = 8.22$  км/с, *1* –  $\lambda = 213$  нм,  $\Delta\tau = 0.24$  мкс, *2* –  $\lambda = 391$  нм,  $\Delta\tau = 1.10$  мкс; *б* –  $V_{УВ} = 10$  км/с,  $P_0 = 0.25$  Торр, *3* –  $\lambda = 420$  нм,  $\Delta\tau = 1.71$  мкс, *4* –  $\lambda = 213$  нм,  $\Delta\tau = 0.46$  мкс.

время экспозиции измерительного оборудования значительно превышает время излучения ударной волны. В этой связи для корректного определения мощности излучения необходимы исследования временных характеристик излучения с достаточным (наносекундным) разрешением.

Работа выполнена в рамках научного плана Института механики МГУ (№ АААА-А19-119012990112-4) при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 20-08-00343).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Streicher J.W., Krish A., Hanson R.K.* // AIAA Scitech 2020 Forum. 2020. V. 1. Pt. F. P. 1.
2. *Левашов В.Ю., Козлов П.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 16
3. *Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Шаталов О.П.* // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105. № 5. С. 732.
4. *Ступоченко Е.В., Лосев С.А., Осипов А.И.* Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.
5. *Ибрагимова Л.Б., Кузнецова Л.А.* // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 5. С. 82.
6. *Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 35.
7. *Ибрагимова Л.Б., Левашов В.Ю., Сергиевская А.Л., Шаталов О.П.* // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 1. С. 131.
8. *Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Y. et al.* // J. Chem. Phys. 2013. V. 139. № 3. P. 034317.

9. *Cruden B.A., Brandis A.M.* // AIAA Paper. 2019. № 2019–3359.
10. *Козлов П.В., Лосев С.А.* Энцикл. низкотемп. плазмы. Т. 2 / Под ред. Фортова Е.В. М.: Наука, 2000. С. 363.
11. *Минцев В.Б., Фортвов В.Е.* // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20. № 4. С. 745.
12. *Белоцерковский О.М., Биберман Л.М., Бронин С.Я., Лагарьков А.Н., Фомин В.Н.* // Там же. 1969. Т. 7. № 3. С. 529.
13. *Wei H., Morgan R.G., Mcintyre T.J., Brandis A.M., Johnston C.O.* // AIAA Paper. 2017. № 2017-4531.
14. *Johnston C.O., Brandis A.M.* // J. Spacecr. Rockets. 2015. V. 52. № 1. P. 105.
15. *Surzhikov S.* // AIAA Paper. 2013. № 2013-0606.
16. *Акимов Ю.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Левашов В.Ю.* Экспериментальный комплекс “Ударная труба”; <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
17. *Лебедева В.В.* Техника оптической спектроскопии. М.: Изд.-во МГУ, 1986.
18. *Малышев В. И.* Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.
19. Hamamatsu deuterium lamps D2 LAMPS. 2020; [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/D2lamps\\_TLS1017E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/D2lamps_TLS1017E.pdf)