

# Experimental Study of Radiation Characteristics of Air behind the Front of a Strong Shock Wave

P. V. Kozlov, I. E. Zabelinskii, N. G. Bykova,  
V. Yu. Levashov, G. Ya. Gerasimov

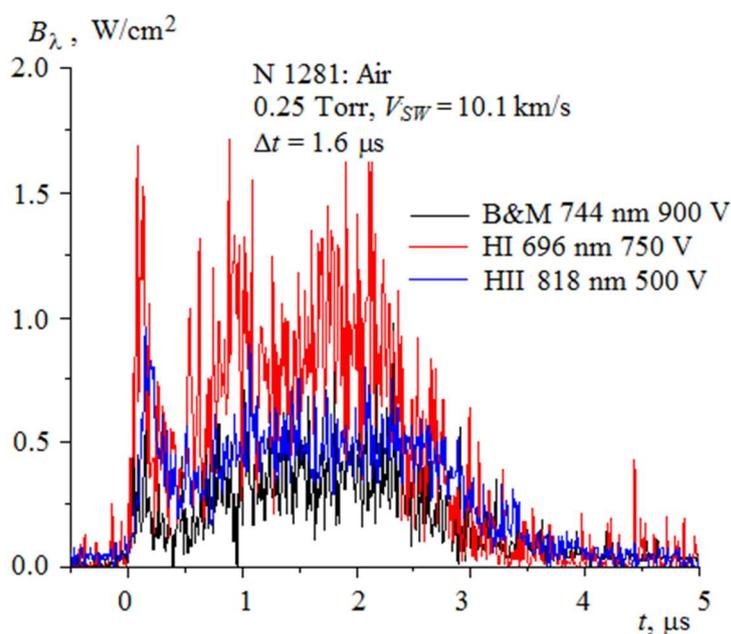
*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, 119192, Russia*

vyl69@mail.ru

## Abstract

The results of measuring the radiation characteristics of air behind a strong shock wave in a two-diaphragm shock tube DDST-M of the Institute of Mechanics (M.V. Lomonosov Moscow State University) at an initial pressure in the driven section of 0.25 Torr and shock wave velocities up to 11 km/s are presented. The shock tube radiation recording system made it possible to record absolute values of the integral-over-time spectral density of radiation in the wavelength range of 190 ÷ 1100 nm and the time evolution of radiation in a selected narrow spectral interval in one experiment.

Keywords: shock waves, emission, air, radiation characteristics.



Time evolution of radiation intensity at different wavelengths

УДК 533.9

# Экспериментальное исследование радиационных характеристик воздуха за фронтом сильной ударной волны

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

*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова,  
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр., 1  
vyl69@mail.ru*

## Аннотация

Приведены результаты измерения радиационных характеристик воздуха за сильной ударной волной на двух-диафрагменной ударной трубе DDST-M Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова при начальном давлении в камере низкого давления 0.25 Торр и скоростях ударной волны до 11 км/с. Система регистрации излучения ударной трубы позволяет в одном эксперименте фиксировать абсолютные значения интегральной по времени спектральной плотности излучения в диапазоне длин волн 190 ÷ 1100 нм и эволюцию во времени излучения в выбранном узком спектральном интервале.

Ключевые слова: ударные волны, излучение, воздух, радиационных характеристики.

## 1. Введение

Оценка воздействия конвективных и радиационных тепловых потоков на поверхность спускаемого космического аппарата при его движении в атмосфере Земли представляет большой интерес в связи с проектами предстоящих миссий на Луну, Марс и Венеру. Величина радиационного теплового потока растет с увеличением скорости и размеров спускаемого космического аппарата и при сверхорбитальных скоростях входа аппарата в атмосферу Земли радиационные тепловые нагрузки на его поверхность становятся преобладающими [1]. Поэтому учет вклада радиационных процессов в общий тепловой поток к поверхности спускаемого аппарата является важным при разработке систем теплозащиты для вновь разрабатываемых космических аппаратов [2].

Информация по излучению ударно нагретого воздуха является результатом обработки экспериментальных данных, полученных в основном на ударных трубах [3–6]. Она используется как для оценки тепловых потоков к поверхности спускаемых космических аппаратов, движущихся в атмосфере Земли, так и для тестирования различного рода компьютерных моделей, способных предсказать поведение высокотемпературного воздуха за фронтом отошедшей ударной волны вблизи поверхности аппарата [7].

В настоящей работе, являющейся продолжением цикла исследований неравновесного излучения ударно нагретого воздуха [8], приведены результаты экспериментальных исследований радиационных характеристик воздуха за сильной ударной волной при скоростях ударной волны до 11 км/с, проведенных в последнее время в Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Частично представленная информация была использована в ряде последних публикаций авторов по данной тематике [6, 9–11]. Опубликованные данные были представлены в единицах мощности излучения, для чего приведенные в настоящей работе панорамные спектры, полученные с помощью метода интегральной по времени спектроскопии, были нормированы на среднее время излучения. Данная процедура была использована для

удобства сравнения панорамных спектров с соответствующими спектрами, измеренными на зарубежных установках с помощью метода 3-D спектроскопии. Среднее время излучения вычисляется с использованием временных осциллограмм для каждого узкого участка спектра и, вообще говоря, зависит от длины волны излучения, что делает процедуру нормировки не совсем корректной.

## 2. Экспериментальная установка

Измерение радиационных характеристик воздуха за сильной ударной волной проводилось на модернизированной ударной установке DDST-M Института механики МГУ, описание и принцип работы которой приведены в [9]. Установка представляет собой цилиндрическую двух-диафрагменную ударную трубу с внутренним диаметром  $D=5$  см, которая состоит из трех секций: камеры высокого давления длиной 1.55 м, промежуточной камеры длиной 3.5 м и камеры низкого давления длиной 3 м. Камера промежуточного давления заполнена гелием, а камера низкого давления – исследуемой газовой смесью. Инициирование ударного процесса производится за счет воспламенения в камере высокого давления стехиометрической смеси кислорода и водорода, разбавленной гелием. Модернизация исходной установки DDST заключалась во включении в ее конструкцию дополнительного элемента – форкамеры, которая отделяет торцевую стенку трубы с поджигающим устройством от основного объема камеры высокого давления перфорированным диском. Подобная конструкция позволяет увеличить энергоэффективность установки за счет более полного сгорания горючей смеси в камере высокого давления [12].

Ударная труба DDST-M оснащена соответствующей аппаратурой, позволяющей измерять интегральные и временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха в изучаемом спектральном диапазоне. Схематическое изображение системы регистрации установки приведено на рис. 1. Интегральное распределение интенсивности излучения (панорамный спектр) фиксируется спектрографом Horiba 1824 и линейным CDD-детектором Hamamatsu S11156 в ультрафиолетовом и видимом (UV/VIS) спектральном диапазоне ( $\lambda = 190 \div 670$  нм), а также спектрографом Horiba 1603 и линейным CDD-детектором Hamamatsu S11156 в видимом и инфракрасном (VIS/IR) спектральном диапазоне ( $\lambda = 500 \div 1100$  нм) в зависимости от скорости ударной волны и начального давления воздуха перед фронтом ударной волны.

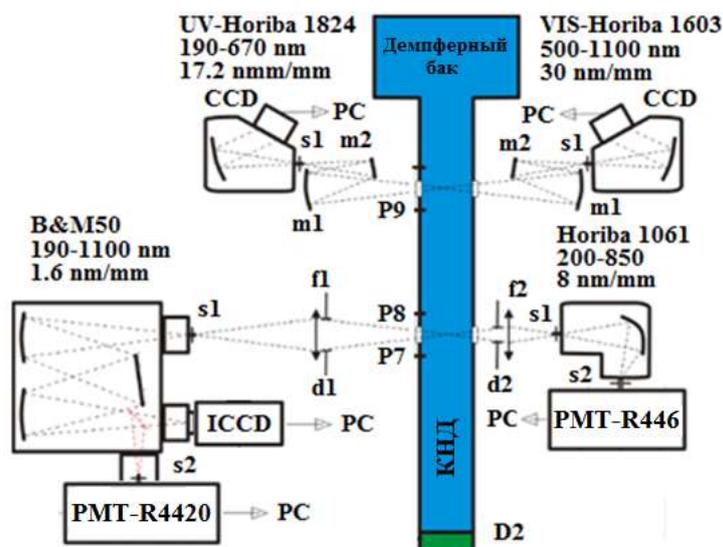


Рис. 1. Система регистрации излучения на установке DDST-M

Временная эволюция излучения в VIS и IR спектральных областях фиксировалась с помощью трех каналов регистрации на ФЭУ в узких спектральных диапазонах, выделенных с помощью монохроматоров, при ширине диапазона  $\Delta\lambda = 4$  нм. Измерительный канал

В&М собран на базе спектрографа В&М50, который фиксирует осциллограммы излучения на ФЭУ R4420 Hamamatsu. Измерительные каналы HI и HII состоят из спектрографов Horiba 1061 и Horiba 1603, соответственно, которые регистрируют излучение на ФЭУ R446 Hamamatsu. Пространственное разрешение оптической системы и полоса пропускания системы регистрации позволяют измерять временное распределение спектральной плотности излучения с высоким временным разрешением (порядка 20 нс).

### 3. Метод измерения

Регистрация радиационного теплового потока в ударной трубе DDST-M за фронтом сильной ударной волны, движущейся вдоль оси ударной трубы со скоростью  $V_{SW}$ , осуществляется через боковую поверхность ударной трубы, как это показано на рис. 1. При этом радиационный тепловой поток  $I_\lambda$ , проходящий через окно на боковой поверхности трубы перпендикулярно оси трубы, накапливается CCD-детектором за время  $\tau = L/V_{SW}$ , где  $L$  – длина «пробки» ударно нагретого газа

$$I_\lambda = \int_0^\tau B_\lambda(t) dt = V_{SW}^{-1} \int_0^L B_\lambda(x) dx \quad (1)$$

Здесь величина  $B_\lambda$  представляет собой объемную мощность излучения, измеряемую в единицах Вт/(см<sup>3</sup>·ср·мкм). Эта величина предполагается постоянной в сечении газа, проходящем мимо окна наблюдения.

Экспериментальные результаты по панорамным спектрам представляются далее в абсолютных единицах в виде полного радиационного теплового потока  $I_\lambda$ , который измеряется в единицах Дж/(м<sup>3</sup>·мкм·ср). Для этого проводится предварительная калибровка измерительной системы. Процедура калибровки подробно описана в [13]. Для перехода в панорамном спектре от радиационного теплового потока  $I_\lambda$  к средней объемной мощности излучения  $B_\lambda$  необходимо разделить  $I_\lambda$  на эффективное время излучения  $\Delta t$  (мкс), которое определяется из временных осциллограмм для каждого узкого участка спектра. Алгоритм определения  $\Delta t$  состоит в замене временной осциллограммы излучения, регистрируемой на определенной длине волны, на равный ей по площади прямоугольник, высота которого равна максимальному значению мощности излучения на осциллограмме. Ширина прямоугольника и принимается равной эффективному времени излучения  $\Delta t$  на данной длине волны [13].

Следует отметить, что более правильным подходом к обработке данных, полученных на ударной трубе DDST-M, является представление экспериментальной информации в виде спектрограммы величины  $I_\lambda = \int B_\lambda(x) dx$ , которая определяется с помощью соотношения (1) и измеряется в единицах Вт/(см<sup>2</sup>·ср·мкм). Эта величина, измеренная через боковую поверхность ударной трубы, фактически представляет собой полную мощность теплового потока излучения, который генерируется «пробкой» ударно нагретого газа в направлении, параллельном направлению движения ударной волны.

### 4. Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментальных исследований на ударной трубе DDST-M измерены абсолютные значения интегральной по времени спектральной плотности излучения  $I_\lambda$  в диапазонах длин волн  $\lambda = 200 \div 600$  нм и  $\lambda = 600 \div 1100$  нм, а также временные зависимости интенсивности излучения  $B_\lambda$  в узких спектральных диапазонах. Временные эволюции регистрировались в трёх каналах В&М, HI и HII. В общей сложности проведены 34 эксперимента при начальном давлении в камере низкого давления  $p_0 = 0.25$  Торр и диапазоне скоростей ударной волны  $V_{SW} = 7.35 \div 11.4$  км/с.

Таблица 1

Общие характеристики экспериментов

N	$V_{sw}$ , км/с	$\lambda$ (В&М), нм	$G_{ICCD}$ (В&М)	$U_{PMT}$ (В&М), В	$\lambda$ (НП), нм	$U_{PMT}$ (НП), В	$\lambda$ (НП), нм	$U_{PMT}$ (НП), В	$\Delta t$ , мкс
1271	9.47						777	500	0.75
1272	10.0						744	500	0.5
1274	9.52						777	500	0.7
1275	10.2						819	500	3.5
1280	10.75	744		800	696	750			2.0
1281	10.1	744		900	696	750	819	500	1.6
1282	9.1	744		900	696	750	819	500	0.6
1283	10.4	744		900			819	500	1.1
1285	10,5	744		800			819	500	3.7
1293	7,5	736	40		744	750	725	600	0.7
1294	8.93	736	50		744	750	725	600	0.74
1295	9.25	825	50		822	750	822	600	0.85
1296	9.80	825	50		822	750	822	600	2.3
1297	10.0	865	50		822	750	822	600	2.7
1298	8.70	865	100		777	750	822	600	0.78
1299	8.93	657	100		648	550	777	500	0.7
1300	9.5	657	100		648	550	777	500	0.6
1301	10.5	607	100		777		792		2.0
1302	10.1	769	100		614	550	598	500	1.87
1304	9.25	786	100		648	500	598	500	1.87
1305	10.4	786	50		777	550	792	500	2..0

В настоящей работе представлены результаты 21 эксперимента. Общие характеристики экспериментов приведены в таблице 1, где показаны номер эксперимента (N), скорость ударной волны ( $V_{sw}$ ), длины волн в соответствующем измерительном канале ( $\lambda$ ), программный коэффициент усиления ( $G_{ICCD}$ ), напряжение питания ФЭУ в соответствующем измерительном канале ( $U_{PMT}$ ) и нормированная длительность излучения выделенных длин волн ( $\Delta t$ ).

Абсолютные значения интегральной по времени спектральной плотности излучения  $I_\lambda$  и временные зависимости интенсивности излучения  $B_\lambda$  в узких спектральных диапазонах, измеренные в каждом эксперименте, приведены ниже на рис. 2–21.

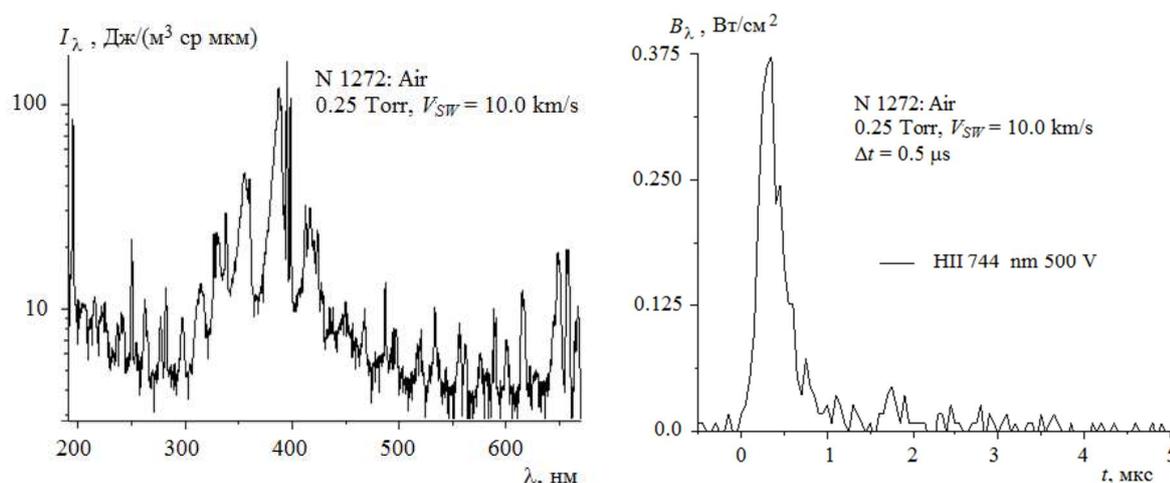


Рис. 2. Эксперимент № 1272: скорость ударной волны  $V_{sw} = 10.0$  км/с

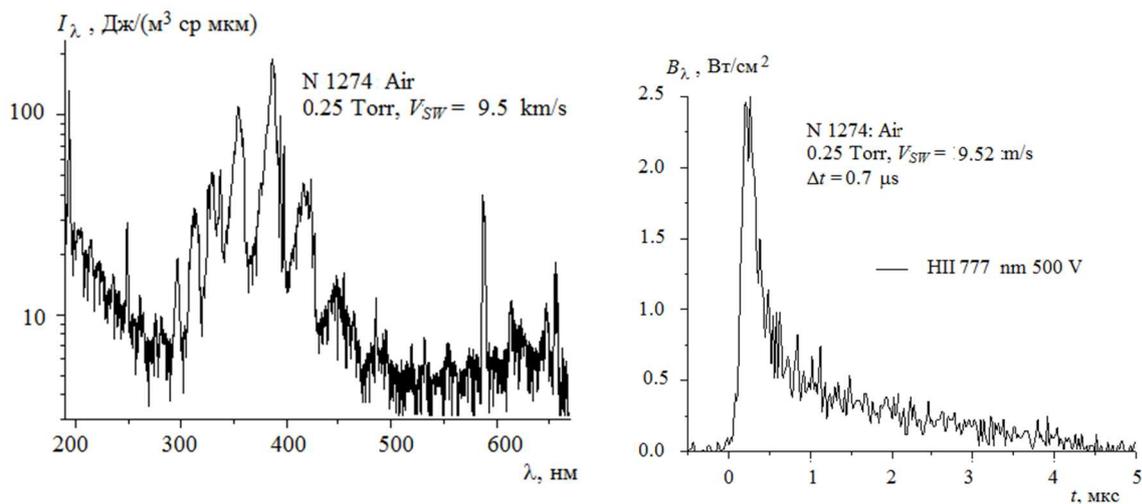


Рис. 3. Эксперимент № 1274: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.52 \text{ км/с}$

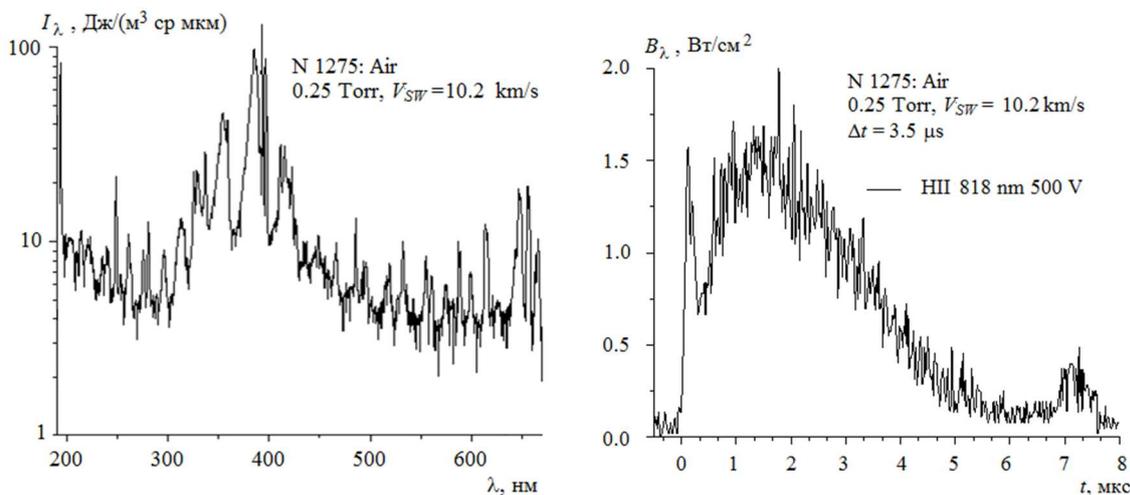


Рис. 4. Эксперимент № 1275: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.2 \text{ км/с}$

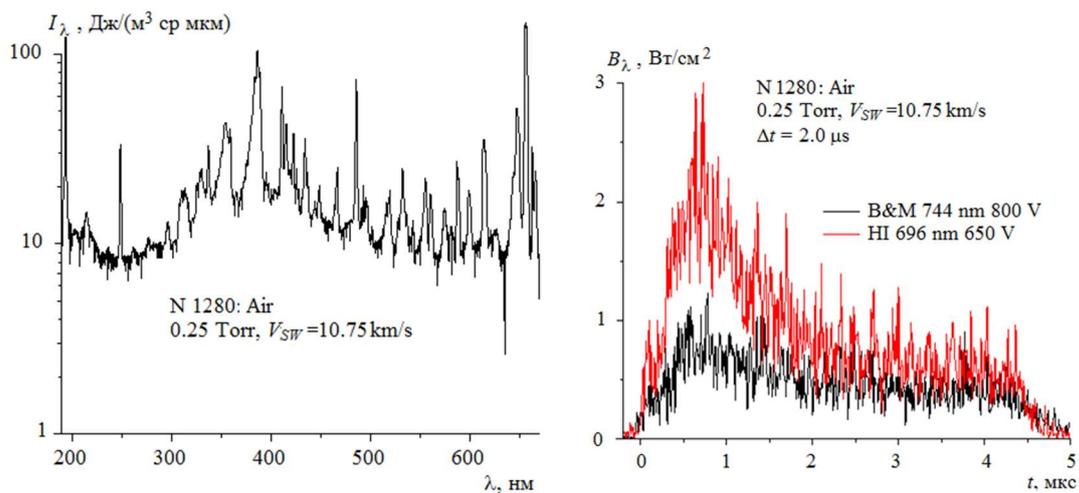


Рис. 5. Эксперимент № 1280: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.75 \text{ км/с}$

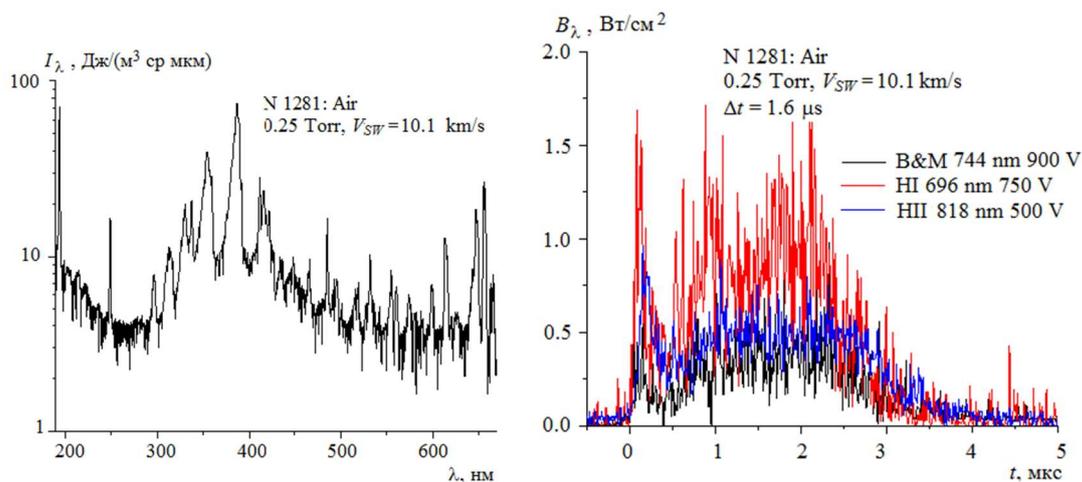


Рис. 6. Эксперимент № 1281: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.1$  км/с

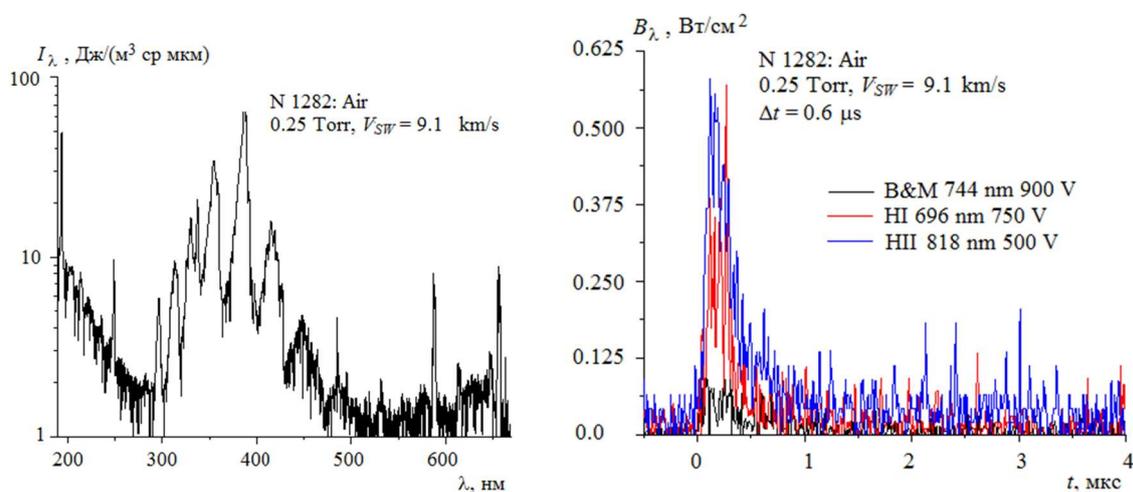


Рис. 7. Эксперимент № 1282: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.1$  км/с

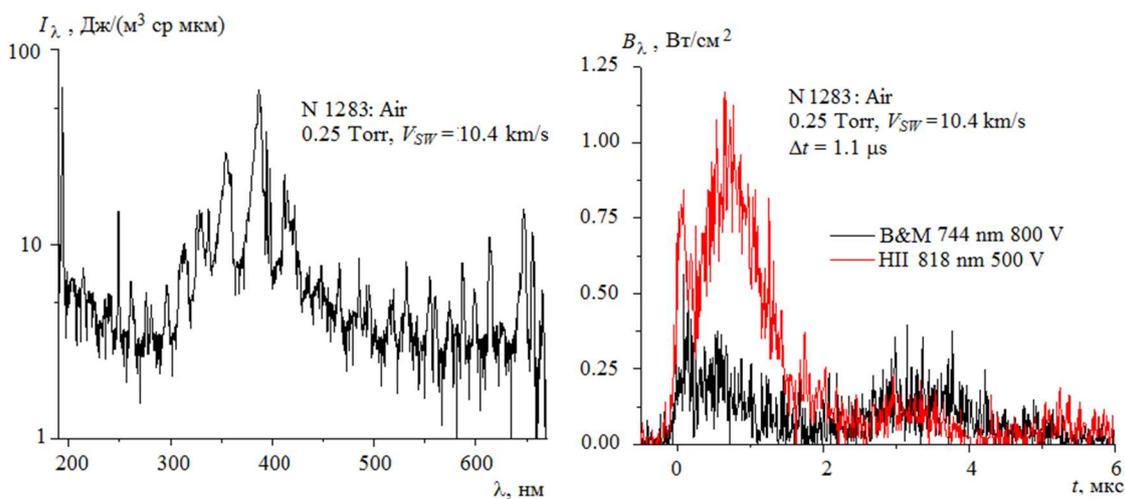


Рис. 8. Эксперимент № 1283: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.4$  км/с

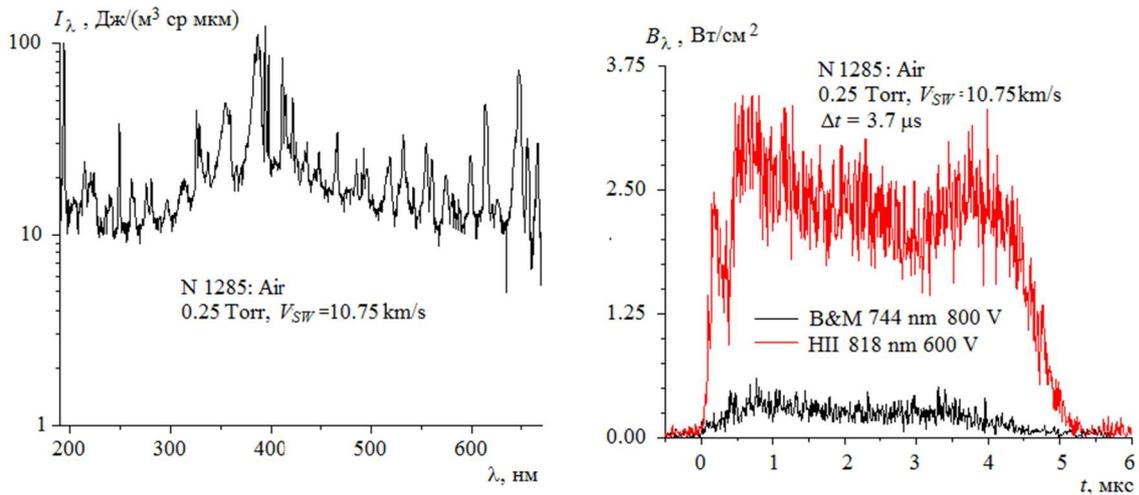


Рис. 9. Эксперимент № 1285: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.75$  км/с

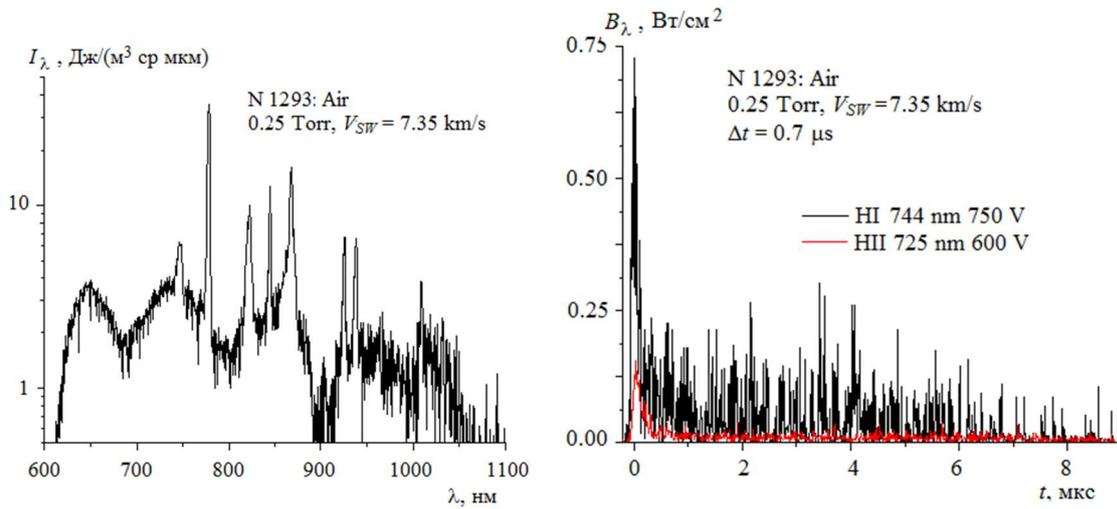


Рис. 10. Эксперимент № 1293: скорость ударной волны  $V_{SW} = 7.35$  км/с

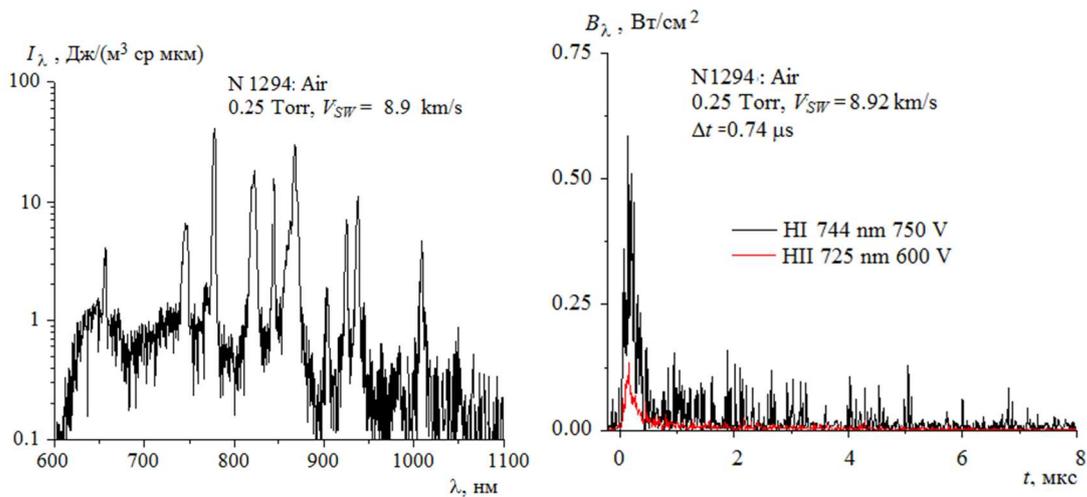


Рис. 11. Эксперимент № 1294: скорость ударной волны  $V_{SW} = 8.92$  км/с

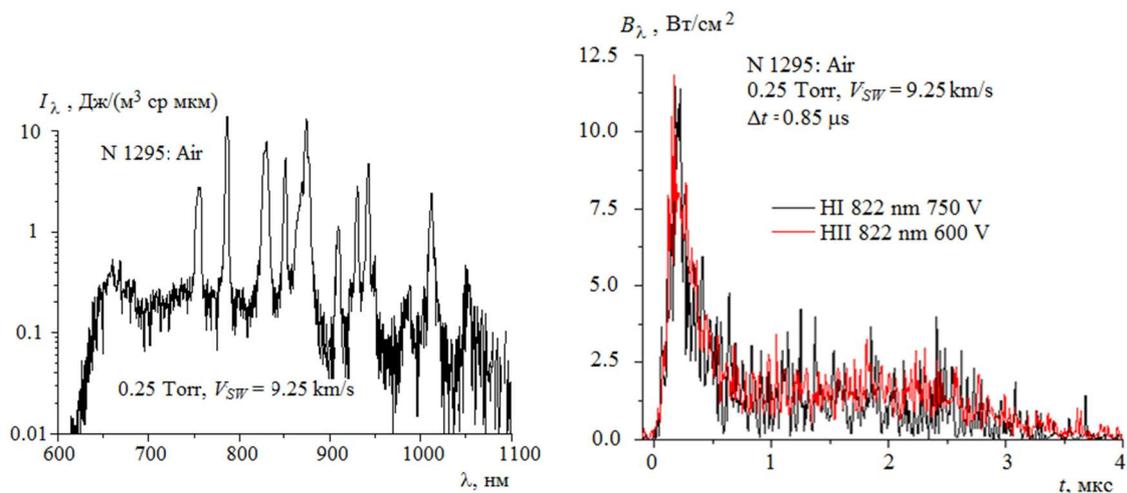


Рис. 12. Эксперимент № 1295: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.25 \text{ км/с}$

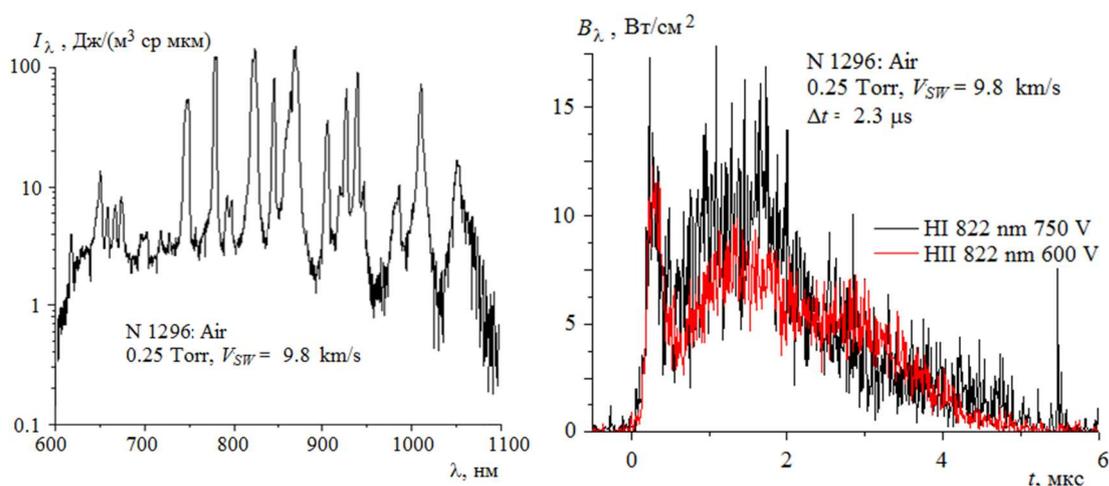


Рис. 13. Эксперимент № 1296: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.8 \text{ км/с}$

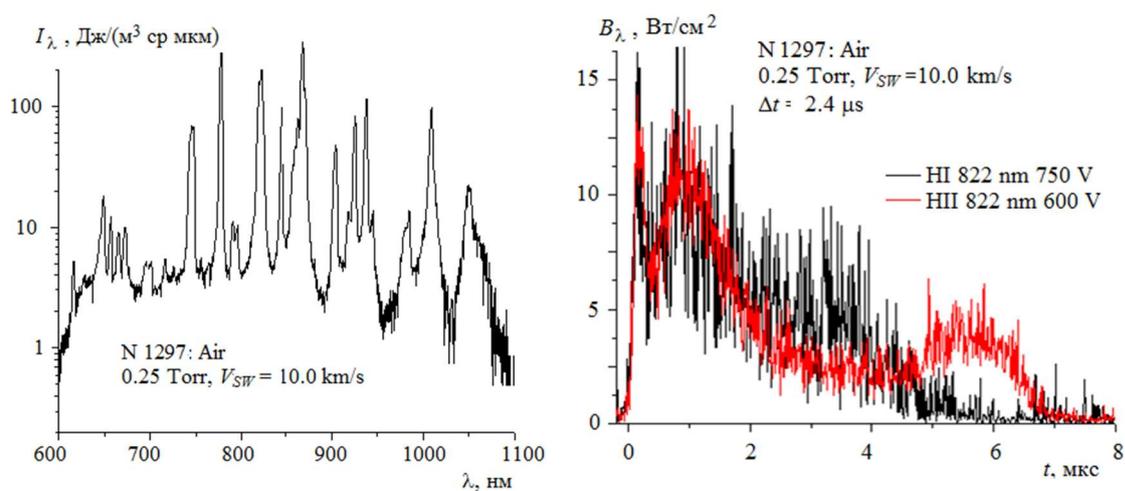


Рис. 14. Эксперимент № 1297: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.0 \text{ км/с}$

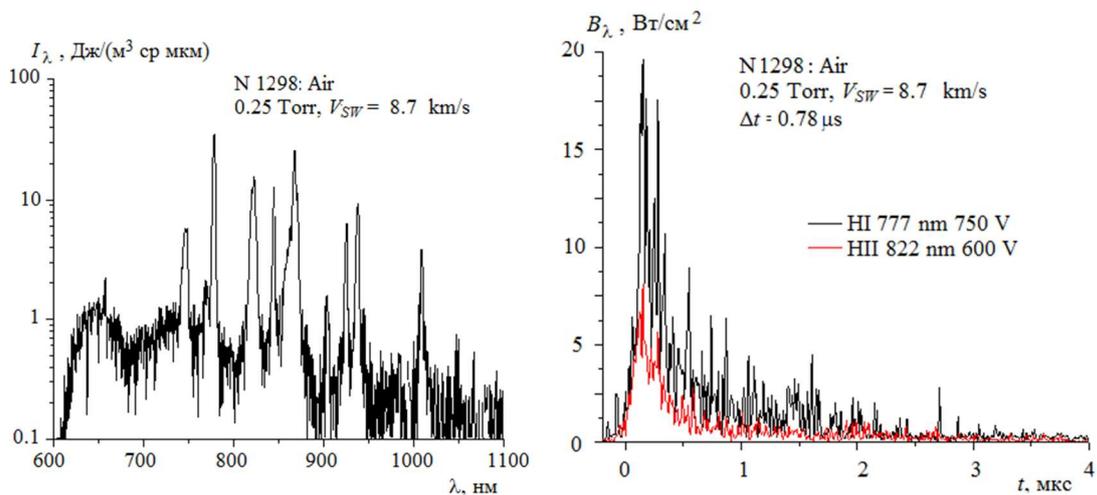


Рис. 15. Эксперимент № 1298: скорость ударной волны  $V_{SW} = 8.7$  км/с

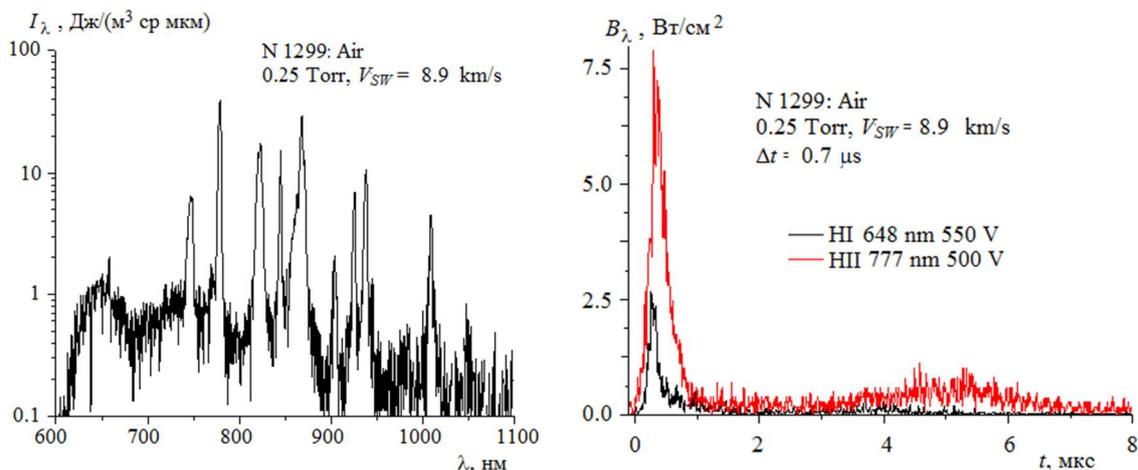


Рис. 16. Эксперимент № 1299: скорость ударной волны  $V_{SW} = 8.9$  км/с

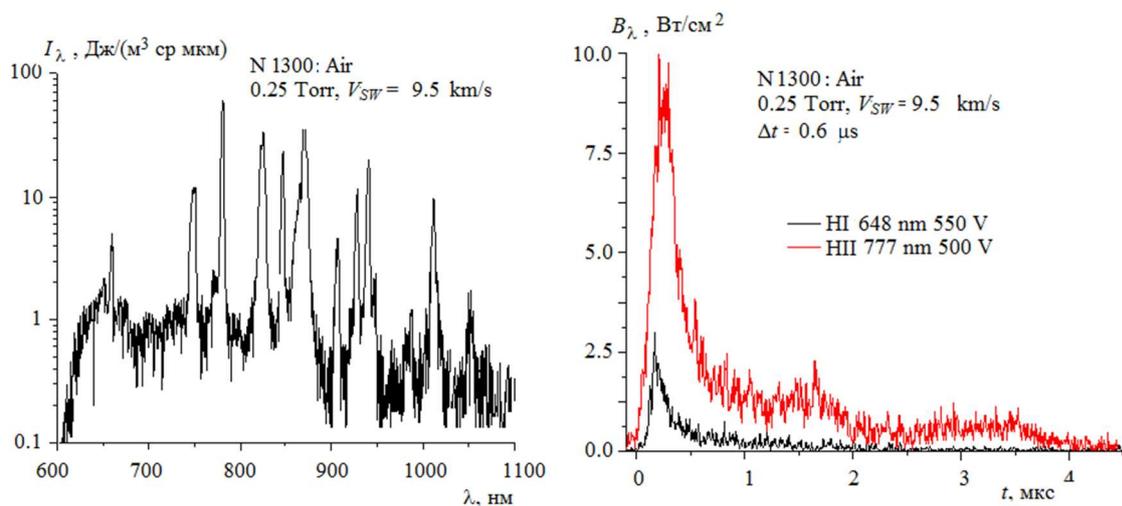


Рис. 17. Эксперимент № 1300: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.5$  км/с

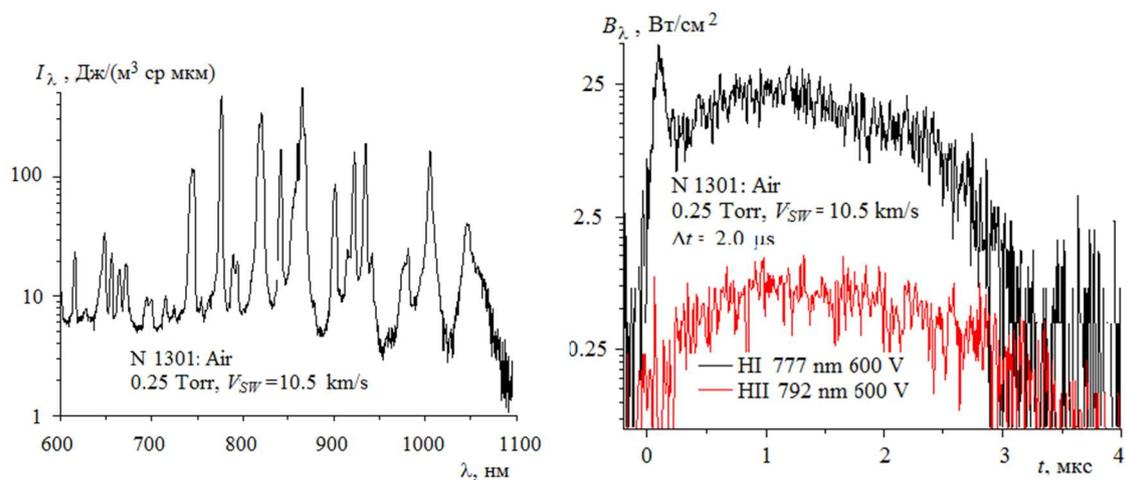


Рис. 18. Эксперимент № 1301: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.5 \text{ км/с}$

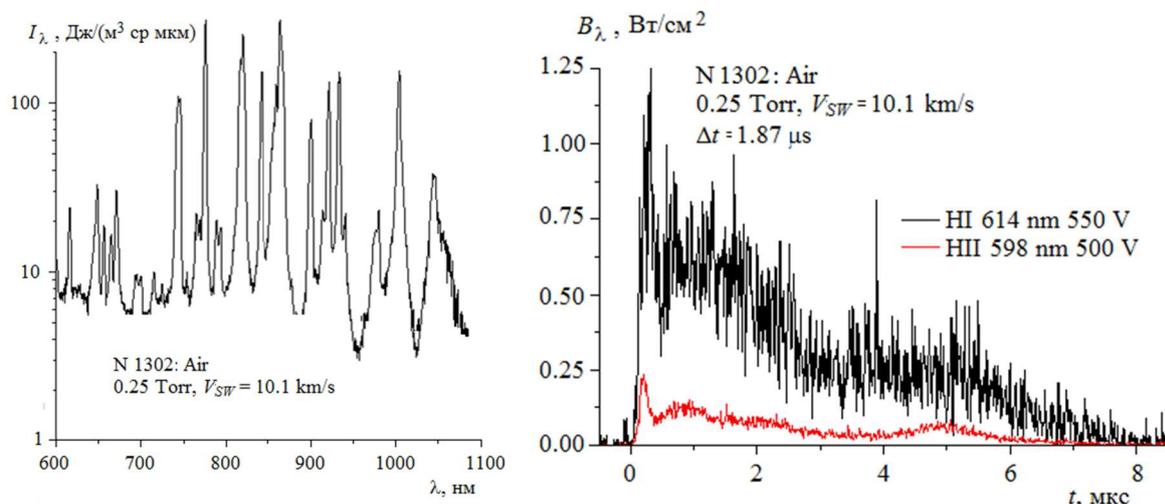


Рис. 19. Эксперимент № 1302: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.1 \text{ км/с}$

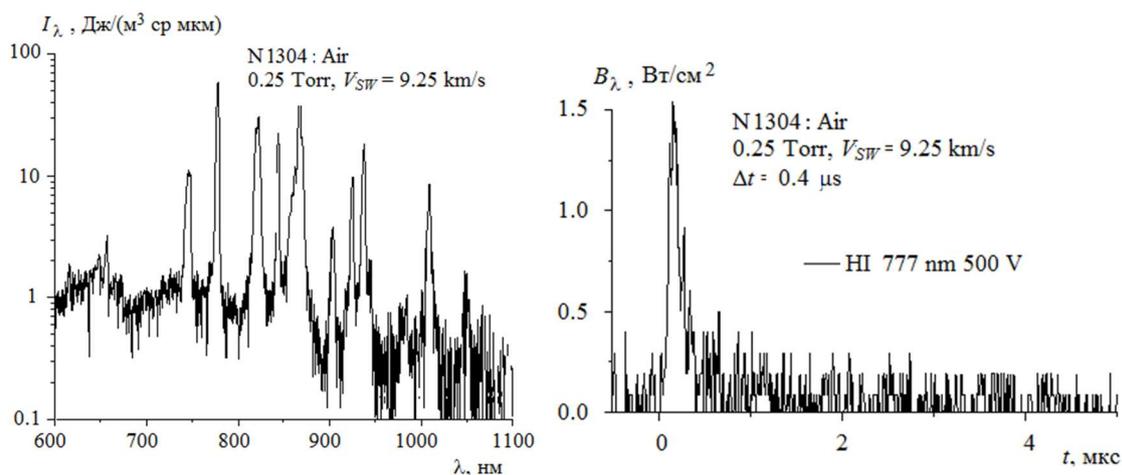
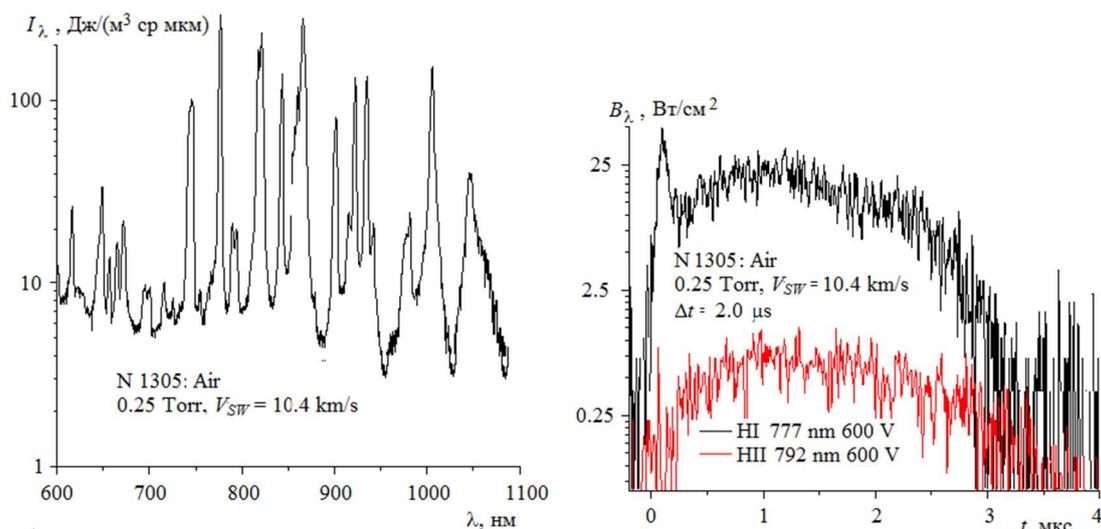


Рис. 20. Эксперимент № 1304: скорость ударной волны  $V_{SW} = 9.25 \text{ км/с}$


 Рис. 21. Эксперимент № 1305: скорость ударной волны  $V_{SW} = 10.4$  км/с

## 5. Обсуждение результатов

Приведенные выше результаты экспериментов можно разбить на две группы. К первой группе относятся данные по панорамным спектрам, полученные в спектральном интервале  $\lambda = 190 \div 650$  нм, который соответствует ультрафиолетовой и видимой областям спектра излучения (см. рис. 2–9). В данном спектральном диапазоне основной вклад в излучение дают молекулярные полосы молекул NO и  $N_2$ , радикалов CN и молекулярных ионов  $N_2^+$ . В интервале длин волн  $\lambda = 190 \div 300$  нм регистрируется в основном излучение системы полос  $\beta, \gamma$  и  $\delta$  молекулы NO, которая образуется в результате переходов  $B^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$ ,  $A^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$  и  $C^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$ , соответственно. В интервале длин волн  $\lambda = 275 \div 400$  нм наблюдается вторая положительная система полос молекулы азота  $N_2(2^+)$ , описываемая переходом  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ . Этот интервал частично перекрывается достаточно интенсивной системой полос молекулярного иона  $N_2^+$  (первая отрицательная система,  $\lambda = 300 \div 500$  нм), образующейся в результате электронного перехода  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ .

На приведенных спектрограммах показан также ряд дополнительных полос, связанных с присутствием в исследуемом воздухе различных примесей и, в частности, углекислого газа. В первую очередь это относится к достаточно интенсивной фиолетовой системе полос цианистого радикала CN ( $\lambda = 330 \div 425$  нм), которая формируется в электронном переходе  $B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$ , и атомарным линиям углерода. Наблюдаются линии излучения радикала OH ( $\lambda = 307 \div 317$  нм) и атома водорода ( $H_\alpha$  и  $H_\beta$ ), которые хорошо контролируют содержание в исследуемом воздухе паров воды.

Вторая группа панорамных спектров получена в спектральном интервале  $\lambda = 600 \div 1100$  нм, который соответствует видимой и инфракрасной областям спектра излучения (см. рис. 10–21). Здесь основной вклад в излучение дают атомарные линии азота и кислорода. На приведенных спектрограммах идентифицирована серия мультиплетов атома азота с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 600, 645, 665, 672, 744, 747, 818, 822, 856, 859, 863, 868, 904, 939, 986, 1011$  и  $1054$  нм, а также серия мультиплетов атома кислорода с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 615, 648, 777, 845$  и  $926$  нм. В спектре присутствуют также мультиплеты атома углерода с максимумами интенсивности на длинах волн  $\lambda = 834, 910$  и  $941$  нм и линия  $H_\alpha$  бальмеровской серии атома водорода с длиной волны  $\lambda = 656$  нм.

Анализ зависимости панорамного спектра от скорости ударной волны  $V_{SW}$  в рассматриваемых спектральных диапазонах показывает, что с ростом величины  $V_{SW}$  и, соответственно, энерговклада в ударно нагретый воздух происходит увеличение интенсивности из-

лучения. При скоростях ударной волны выше 10 км/с это увеличение замедляется, что связано с диссоциацией молекул при повышении температуры газа за фронтом ударной волны. Основную роль в излучении ударно нагретого воздуха начинают играть атомы азота и кислорода, эмиссионные линии которых лежат в основном в инфракрасном диапазоне спектра.

Временные характеристики излучения ударно нагретого воздуха, измеренные на определенных длинах волн, позволяют определить эффективное время излучения  $\Delta t$ , которое зависит не только от длины волны излучения, но и от скорости распространения ударной волны. В приведенных выше экспериментальных данных величина  $\Delta t$  меняется от 0.5 до 3.7 мкс и служит критерием для пересчета объемной плотности энергии излучения  $I_\lambda$  на объемную мощность излучения  $B_\lambda$ , обычно измеряемую в единицах Вт/(см<sup>3</sup>·мкм·ср). Временные характеристики излучения играют большую роль в тестировании радиационно-столкновительных моделей.

## 6. Заключение

Результаты проведенных измерений спектральных характеристик ударно нагретого воздуха показывают, что в интервале длин волн излучения  $\lambda = 190 \div 650$  нм, который соответствует UV/VIS областям спектра излучения, основной вклад в излучение дают молекулярные полосы молекул NO и N<sub>2</sub>, радикалов CN и молекулярных ионов N<sub>2</sub><sup>+</sup>. В интервале длин волн  $\lambda = 600 \div 1100$  нм, который соответствует VIS/IR областям спектра излучения, регистрируется в основном излучение атомарных линий азота и кислорода, причем интенсивность излучения растет с увеличением скорости ударной волны.

Поведение временных спектральных характеристик зависит не только от длины волны излучения, но и от скорости распространения ударной волны. Временные спектральные характеристики позволяют вычислить эффективное время излучения  $\Delta t$  на выделенных длинах волн излучения, которое в зарегистрированных экспериментальных данных меняется от 0.5 до 3.7 мкс.

Полученная экспериментальная информация может быть использована как для оценки тепловых потоков к поверхности спускаемых космических аппаратов, движущихся в атмосфере Земли, так и для тестирования различного рода компьютерных моделей, способных предсказать поведение высокотемпературного воздуха за фронтом отошедшей ударной волны вблизи поверхности аппарата.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Экспериментальное и теоретическое исследование кинетических процессов в газах» (номер гос. регистрации АААА-А19-119012990112-4).

## Литература

1. Johnson S.M. Thermal Protection Materials and Systems: An Overview // Engineered Ceramics: Current Status and Future Prospects, ed. By Ohji T., Singh M. New York, Wiley & Sons, 2016. Pp. 224–243.
2. Uyanna O., Najafi H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects // Acta Astronaut. 2020. Vol. 176. Pp. 341–356.
3. Brandis A. M., Johnson C. O., Cruden B. A. Investigation of non-equilibrium radiation for Earth entry // AIAA Paper 2016–3690.
4. McGilvray M., Doherty L. J., Morgan R. G., Gildfind D. E. T6: The Oxford University Stalker tunnel // AIAA Paper 2015-3545.

5. Lino da Silva M., Perreira R., Vargas J., Rodrigues R., Carvalho B., Alves L.L., Gonçalves B., Smith A., Merrifield J., McDowell S., Evans D., Reynier P., Villace V. F., Marraffa L. European shock-tube for high enthalpy research: Design and instrumentation, manufacturing, and acceptance testing // AIAA Paper 2020-0624.
6. Kozlov P. V., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., Kotov M. A., Zabelinsky I. E. Radiation properties of air behind strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2024. Vol. 214. Pp.303–315.
7. Суржиков С. Т. Применение квазистационарных eRC-моделей для расчета неравновесного излучения ударных волн при скорости порядка 10 км/с // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2022. Т. 23, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1015/>
8. Козлов П. В. Экспериментальное исследование радиационных свойств воздуха за фронтом ударной волны при скоростях до 10 км/с // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* 2016. Т. 17, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-1/articles/624/>
9. Kozlov P. V., Zabelinsky I. E., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., and Tunik V. Yu. Experimental study of air radiation behind a strong shock wave // *Acta Astronaut.* 2022. Vol. 194. Pp. 461–467.
10. Козлов П. В., Забелинский И. Е., Быкова Н. Г., Герасимов Г. Я., Левашов В. Ю. Экспериментальное исследование излучательных характеристик ударно нагретого воздуха в ультрафиолетовой и видимой областях спектра // *Изв. РАН. МЖГ.* 2022. № 6. С. 85–93.
11. Козлов П. В., Забелинский И. Е., Быкова Н. Г., Герасимов Г. Я., Левашов В. Ю. Излучательные характеристики ударно нагретого воздуха в видимой и инфракрасной областях спектра // *Изв. РАН. МЖГ.* 2023. № 5. С. 138–146.
12. Забелинский И. Е., Козлов П. В., Акимов Ю. В., Быкова Н. Г., Герасимов Г. Я., Туник Ю. В., Левашов В. Ю. Детонационное инициирование сильных ударных волн для исследования радиационных характеристик высокотемпературных газов // *Химическая физика.* 2021. Т. 40. № 11. С. 22–28.
13. Козлов П. В., Забелинский И. Е., Быкова Н. Г., Акимов Ю. В., Левашов В. Ю., Герасимов Г. Я., Тереза А. М. Развитие методики регистрации интенсивности излучения газов за фронтом сильных ударных волн // *Химическая физика.* 2021. Т. 40. № 8. С. 26–33.

## References

1. Johnson S. M., Thermal Protection Materials and Systems: An Overview, *Engineered Ceramics: Current Status and Future Prospects*, ed. by Ohji T., Singh M, New York, Wiley & Sons, 2016, pp. 224–243.
2. Uyanna O., Najafi H., Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects, *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 176, pp. 341–356. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.06.047
3. Brandis A. M., Johnson C. O., Cruden B. A., Investigation of non-equilibrium radiation for Earth entry, AIAA Paper 2016–3690. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3690>
4. McGilvray M., Doherty L. J., Morgan R. G., Gildfind D. E., T6: The Oxford University Stalker tunnel, AIAA Paper 2015-354, DOI:10.2514/6.2015-3545
5. Lino da Silva M., Perreira R., Vargas J., Rodrigues R., Carvalho B., Alves L.L., Gonçalves B., Smith A., Merrifield J., McDowell S., Evans D., Reynier P., Villace V. F., Marraffa L., European shock-tube for high enthalpy research: Design and instrumentation, manufacturing, and acceptance testing, AIAA Paper 2020-0624, DOI:10.2514/6.2020-0624
6. Kozlov P. V., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., Kotov M. A., Zabelinsky I. E., Radiation properties of air behind strong shock wave, *Acta Astronaut.*, 2024, vol. 214, pp. 303–315. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.10.033

7. Surzhikov S. T., Application of quasi-stationary eRC models for calculating nonequilibrium radiation of shock waves at a velocity of about 10 km/s, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, issue 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1015/>
8. Kozlov P. V., Experimental study of the radiation properties of air behind the shock wave front at speeds up to 10 km/s, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2016, vol. 17, issue 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-1/articles/624/>
9. Kozlov P. V., Zabelinsky I. E., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya., Levashov V. Yu., and Tunik V. Yu., Experimental study of air radiation behind a strong shock wave, *Acta Astronaut*, 2022, vol. 194, pp. 461–467. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.10.032
10. Kozlov P. V., Zabelinsky I. E., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya, Levashov V. Yu., Experimental study of the radiative characteristics of shock-heated air in the ultraviolet and visible spectral regions, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 6, pp. 780–788. DOI: 10.1134/S0015462822601322
11. Kozlov P. V., Zabelinsky I. E., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya, Levashov V. Yu., Radiation characteristics of shock-heated air in the visible and infrared spectral ranges, *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 5, pp. 960–967. DOI: 10.1134/S0015462823601328
12. Zabelinsky I. E., Kozlov P. V., Akimov Yu V., Bykova N. G., Gerasimov G. Ya, Tunik Yu V., Levashov V. Yu., Detonation initiation of strong shock waves in order to study the radiation characteristics of high-temperature gases, *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2021, vol. 15, no. 6, pp. 977–983. DOI: 10.1134/S1990793121060117
13. Kozlov P. V., Zabelinskii I. E., Bykova N. G., Akimov Yu V., Levashov V. Yu, Gerasimov G. Ya, Tereza A. M., Development of a technique for recording the intensity of the emission of gases behind the front of strong shock waves, *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 652–658. DOI: 10.1134/S1990793121040199

Статья поступила в редакцию 18 августа 2025 г.