

# УДАРНАЯ ТРУБА ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ МГУ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

П.В. Козлов, Ю.В. Романенко

МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1

## Аннотация

Приводятся основные технические параметры системы регистрации излучения ударной волны, используемой на двухдиафрагменной ударной трубе института механики МГУ. Представлены экспериментальные результаты изменения во времени основных излучающих молекулярных компонент смеси моделирующей атмосферу Марса с высоким временным разрешением.

## MGU MECHANICS INSTITUTE SHOCK TUBE FOR RADIATION IN HIGH TEMPERATURE GAS STREAMLINES RESEARCHES

P.V. Kozlov, Y.V. Romanenko

Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow, 119991

The basic technical parameters of the system registration of radiation of shock-wave on the double diaphragm shock tube facility located at the Institute of Mechanics of Moscow State University. This paper presents experimental results temporal evolution of major emitting molecular components for a mixture similar to the Martian with high temporal resolution.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Основным инструментом для исследования физико-химической кинетики и излучения сильных ударных волн служат ударные трубы. Экспериментальные данные, получаемые на ударных трубах, представляют существенный интерес, как для аэрокосмических приложений, так и для фундаментальных исследований. Параметры газа за фронтом ударной волны достаточно однородны поперек потока, что позволяет применять различные экспериментальные методики для диагностики потока. Развитие экспериментальной техники в последнее десятилетие позволяет получать более точные и детальные данные о параметрах высокотемпературных газовых потоков за фронтом ударной волны, по сравнению с большим массивом экспериментальных данных полученных в предыдущие десятилетия. Новые экспериментальные данные по кинетике сильных ударных волн позволяют существенно продвинуться в развитии неравновесных расчетно-теоретических моделей физико-химической кинетически и неравновесного излучения ударно сжатого слоя.

## 2. УСТАНОВКА УТД

### 2.1. Функциональная схема установки

Двухдиафрагменная ударная труба (УТД) с системой регистрации изображена на рис. 1.

Ударная труба состоит из трех секций: камеры высокого давления (СНР) длиной 1.55 м, промежуточной камеры (СІР) длиной 3.5 м и камеры низкого давления (СЛР) длиной 3 м (рис.1.). Откачка ударной трубы проводится с помощью безмасляного спирального насоса ISP-250 и безмасляного откачного поста собранного базе спирального насоса ISP-90 и турбомолекулярного насоса ТМН-150/63. Предельный вакуум в камере низкого давления при проведении экспериментов не чаще одного раза в сутки и откачке не менее 3

часов составляет  $\sim 10^{-5}$  Торр. В этих условиях натекание не превышает  $10^{-5}$  Торр в минуту, и определяется в основном дегазацией со стенок.

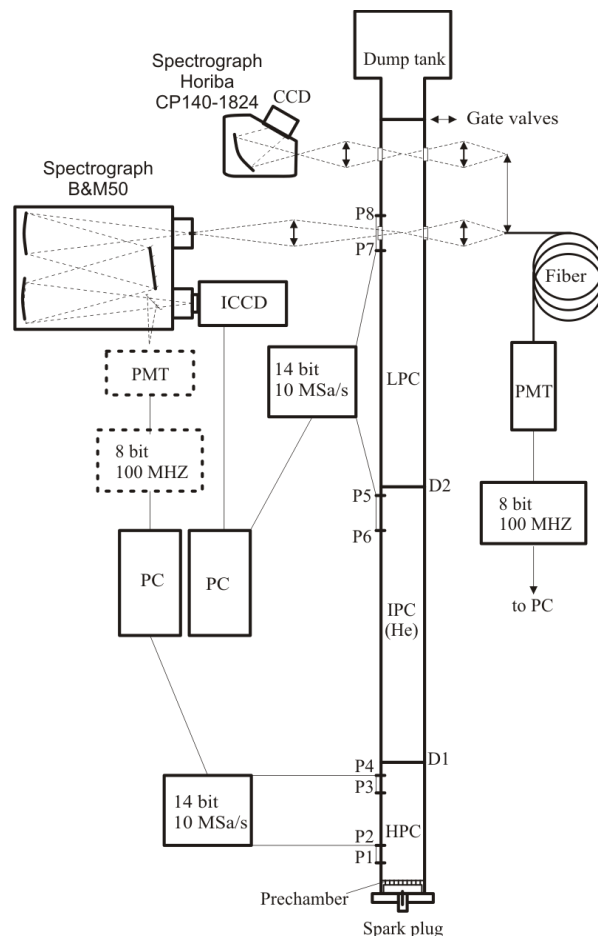


Рис. 1. Система регистрации ударной трубы двухдиафрагменной

Время от момента наполнения камеры низкого давления исследуемым газом до момента выстрела ударной трубы не превышает 2 минут, следовательно, количество неконтролируемых примесей в экспериментах не превышает  $3 \times 10^{-5}$  Торр. Камера высокого давления работает преимущественно в режиме детонации кислородно-водородной смеси, разбавленной гелием. Для ускорения перемешивания смеси в камере высокого давления кислород и гелий в нужной пропорции заранее перемешаны и хранятся в баллоне из-под гелия. Для получения стабильной работы СНР в детонационном режиме время перемешивания смеси  $\text{H}_2:\text{O}_2:\text{He}=2:1:3$  составляет не менее часа. Более подробно работа камеры высокого давления описана в работе [1].

В качестве диафрагм между камерами высокого и промежуточного давления используется медная фольга толщиной 300 мкм с насечками. При этом практически отсутствует увлечение в поток обрывков материала диафрагм. В качестве диафрагм между камерами промежуточного и низкого давления используется медная фольга толщиной 400 мкм с насечками. Использование такого типа диафрагм позволило в настоящее время достигать скоростей ударной волны 8 км/с при начальном давлении воздуха в камере низкого давления 0.25 Торр.

Измерение скорости ударной волны в измерительном сечении осуществляется пьезодатчиками P7-P8. Пьезодатчики P1-P6 необходимы для отладки режимов работы ударной трубы. Регистрация сигналов с пьезодатчиков выполняются цифровыми запоминающими осциллографами с шириной полосы 10 МГц (*L-Card E20-10*).

В камере низкого давления на расстоянии 50 и 60 калибров от диафрагмы D2 напротив друг друга расположено по паре оптических окон диаметром 10 мм для наблюдения за излучением исследуемого газа. Материал окон можно оперативно менять. В данной работе использовались окна из плавленого кварца. Через эти окна в каждом эксперименте производится измерение, как спектрального состава излучения, так и изменение во времени интенсивности излучения.

В главном спектральном канале, собранном на базе спектрографа V&M50 производились измерения абсолютной интенсивности излучения ударно нагретого газа. Для регистрации излучения использовалась ICCD камера. Запуск ICCD камеры в экспериментах осуществлялся от сигнала с пьезодатчика P7. Момент запуска контролировался на осциллографе с точностью не хуже 0.4 мкс.

Во вспомогательном канале регистрируется излучение ударно-нагретого газа в относительных единицах. Спектральные измерения проводятся с помощью стробируемой CCD линейки Hamamatsu установленной на выходе спектрографа Horiba SP-40. Этот канал измерения позволяет наблюдать панорамный спектр излучения в спектральном диапазоне 350÷1100 нм одновременно со спектром полученном в главном спектральном канале в одном из спектральных поддиапазонов (200÷420 нм, 405÷635 нм и 625÷850 нм). Таким образом, имеется возможность получить весь спектр в диапазоне 200÷1100 нм в абсолютных единицах ин-

тенсивности за один выстрел ударной трубы. Процедура проведения абсолютной калибровки подробно описана в [2].

На рис.2. представлены спектры излучения, полученные на ICCD камере а) и на CCD линейке (в относительных не откалиброванных по спектральной чувствительности единицах) б). В спектрах идентифицируются излучение: молекулы  $\text{NO}(\gamma, \Delta, \epsilon)$  в диапазоне длин волн 200÷280 нм; излучение второй положительной системы азота 280÷380 нм и первой отрицательной системы  $\text{N}_2^+$  300÷420 нм. В диапазоне длин волн от 500 до 1100 в основном преобладает излучение атомарных линий кислорода и азота.

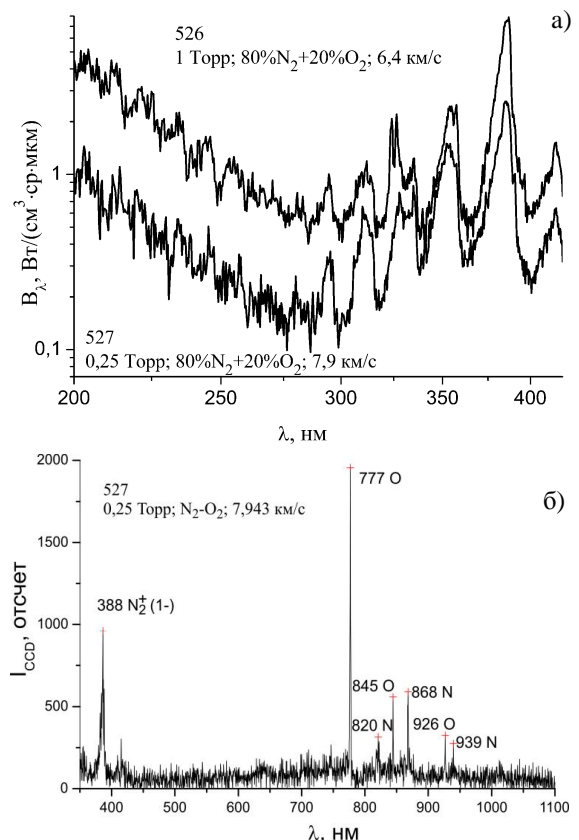


Рис. 2. Спектры излучения ударно нагретой смеси моделирующей атмосферу Земли  $\text{N}_2:\text{O}_2=4:1$ : а) эксперимент №526, 527 ICCD матрица; б) эксперимент №527 CCD линейка

Спектральные измерения излучения для смеси моделирующей атмосферу Марса и сравнение с расчетной моделью приводятся в работах [3, 4].

Для измерения эволюции во времени излучения в ударно сжатом слое в системе регистрации предусмотрены два канала. Первый постоянный измеряющий интегральное излучение в спектральном диапазоне 200-850 нм. Второй канал используется в случае необходимости проведения временных измерений в выделенном спектральном интервале, при этом в случае использования этого канала регистрация спектров в главном спектральном канале невозможна. Измерения интенсивности в обоих каналах относительные, но их амплитуда в серии экспериментов, когда оптическая схема не перестраивается, может быть откалибрована в абсолютных единицах.

Область спектральной чувствительности постоянного канала определяется в основном спектральной чувствительностью ФЭУ-100, так как используемое 100 микронное оптическое волокно имеет пропускание в диапазоне длин волн 190÷1200 нм.

Временное разрешение этого канала определяется используемой оптической схемой, диаметром волокна, диаметром диафрагмы на фокусирующей линзе 1,5 мм, геометрией схемы и было не хуже 150 нс. Регистрация сигналов с ФЭУ осуществлялась цифровым запоминающим осциллографом с полосой пропускания 100 МГц. Пример временного профиля интегрального излучения приведен на рис. 3.

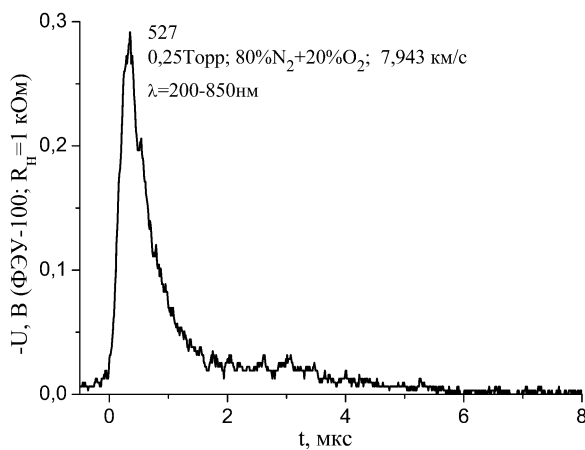


Рис. 3. Временное поведение интегрального излучения для смеси 80%N<sub>2</sub>+20%O<sub>2</sub>. Условия проведения эксперимента (номер эксперимента, начальное давление, состав смеси, скорость ударной волны и спектральный диапазон) указаны на рисунке

Спектральное разрешение второго канала регистрации эволюции во времени интенсивности определяется используемой дифракционной решеткой и шириной выходной щели спектрографа В&М50. Для выходной щели 100 мкм и решетки 150 штр./мм спектральное разрешение канала составляет 1.3 нм.

Временное разрешение второго канала определяется амплитудно-частотными характеристиками используемой электрической схемы (частотные характеристики ФЭУ-100 и осциллографа, нагрузочное сопротивление и длина кабеля) составляет не более 30 нс при R<sub>н</sub> = 1 кОм и ~8 нс на R<sub>н</sub> = 50 Ом. Нагрузочное сопротивление выбиралось из условия оптимальной чувствительности ФЭУ и достижения минимально возможного временного разрешения. Временное разрешение этого канала, определяемое геометрией оптической схемы составляет 12 нс для 100 микронной входной щели на спектрографе В&М50, при скорости ударной волны 8 км/с.

Отдельно выполненное исследование начала излучения относительно прихода в измерительное сечение газодинамического фронта с помощью лазерного шпирен метода, позволило «привязать» начало излучения к фронту ударной волны с точностью не лучше чем 20 нс. Такая точность достигается только при использовании R<sub>н</sub> = 50 Ом на ФЭУ. Для R<sub>н</sub> = 1 кОм точность «привязки» составляет 100 нс.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве современных экспериментов по исследованию излучения за фронтом ударной волны временное разрешение составляет более 100 нс. Это связано с использованием вместо ФЭУ систем основанных на одновременной регистрации пространственного и спектрального распределений на ICCD матрицу за времена 100 и более наносекунд[5]. Только в небольшом числе экспериментальных работ исследуется вопрос о начале излучения относительно газодинамического фронта, например в работе [6].

Результаты исследования эволюции во времени излучения различных молекулярных полос в смеси 70% CO<sub>2</sub>+30% N<sub>2</sub> моделирующей атмосферу Марса показаны на рис. 4–9.

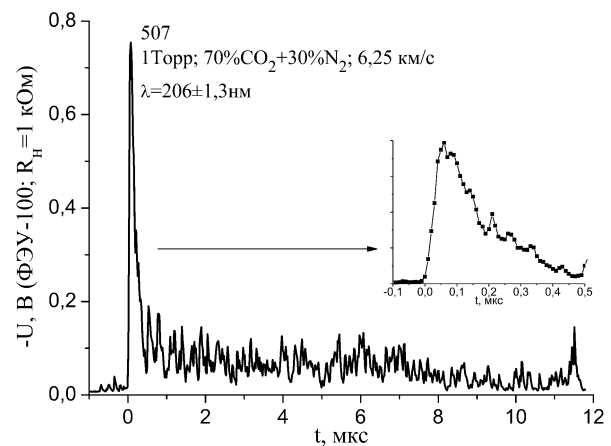


Рис. 4. Временное поведение излучения для смеси 70% CO<sub>2</sub> + 30% N<sub>2</sub>: полоса CO(4<sup>+</sup>)

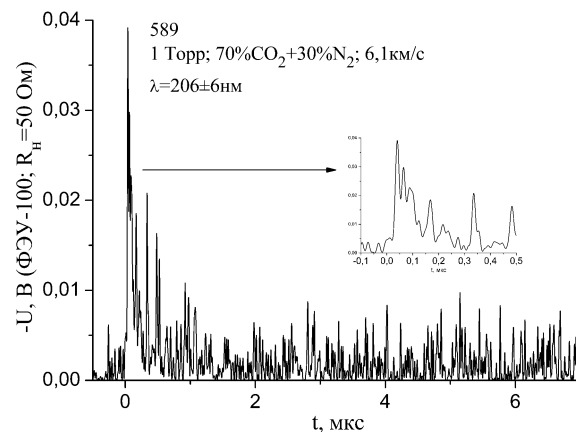


Рис. 5. Временное поведение излучения для смеси 70% CO<sub>2</sub> + 30% N<sub>2</sub>: полоса CO(4<sup>+</sup>)

Сравнение приведенных экспериментальных результатов (рис. 4–9) с модельными расчетами для аналогичных условий, выполненных в работах [7, 8] дает хорошее совпадение, как фронта нарастания, так и длительности пика излучения для молекулы CO (полоса 4<sup>+</sup>). Для молекулы циана (фиолетовая система) более быстрое нарастание фронта и более короткая длительность пика наблюдается в эксперименте по сравнению с модельными расчетами. Для молекулы C<sub>2</sub> можно провести сравнение только с работой [7]. Сравнение показывает, что фронт нарастания и длитель-

ность пика в эксперименте на порядок короче, чем в расчете. На такое различие нами указывалось еще в работе [2] где предлагаются реакции, которые позволяют добиться удовлетворительного совпадения расчетов с экспериментом.

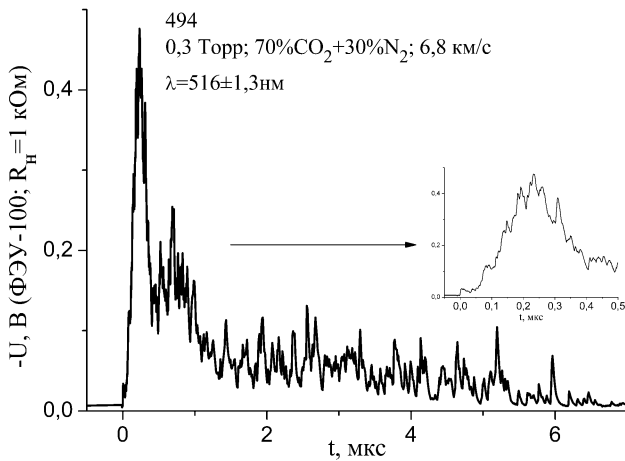


Рис. 6. Временное поведение излучения для смеси 70%CO<sub>2</sub> + 30%N<sub>2</sub>: полосы Свана молекулы C<sub>2</sub>

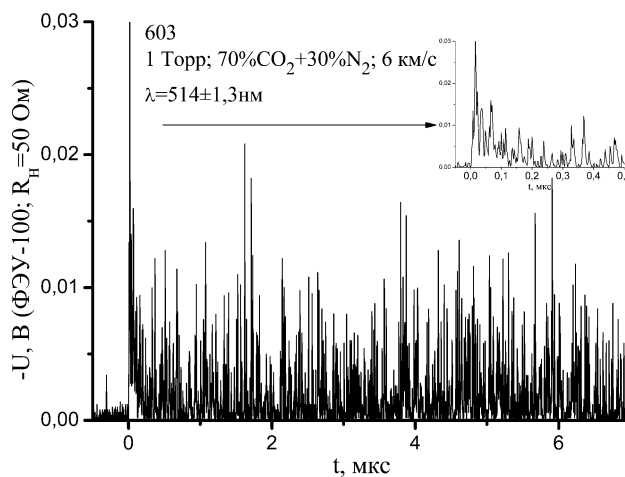


Рис. 7. Временное поведение излучения для смеси 70%CO<sub>2</sub> + 30%N<sub>2</sub>: полосы Свана молекулы C<sub>2</sub>

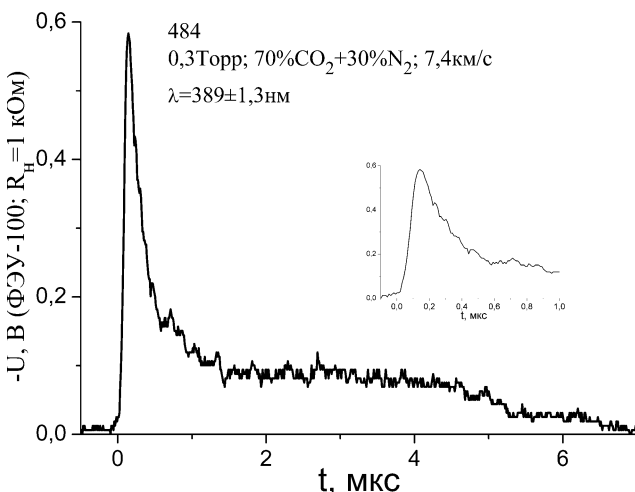


Рис. 8. Временное поведение излучения для смеси 70%CO<sub>2</sub> + 30%N<sub>2</sub>: фиолетовая полоса молекулы CN

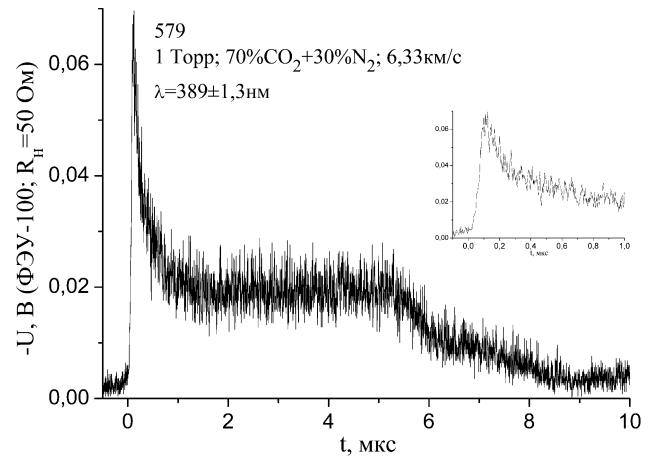


Рис. 9. Временное поведение излучения для смеси 70%CO<sub>2</sub> + 30%N<sub>2</sub>: фиолетовая полоса молекулы CN

Характерные времена нарастания и длительности пика излучения, для молекул CO и C<sub>2</sub>, соответствуют расстояниям в единицы длин свободного пробега молекул перед фронтом ударной волны. Значит, максимальная интенсивность излучения для этих молекул происходит за счет высокоэнергетических столкновений в зоне фронта ударной волны. Поэтому использование модели прямой ударной волны без учета структуры фронта может приводить к заниженным значениям интенсивности неравновесного излучения этих молекул. На необходимость учета поступательной неравновесности во фронте ударной волны при расчетах кинетики химических реакций указывалось работах [8–10].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана двухдиафрагменная ударная труба НИИ механики МГУ с системой регистрации.

Измерены абсолютные значения объемной плотности излучения за фронтом ударной волны для смеси 80%N<sub>2</sub> + 20%O<sub>2</sub>. Для тех же условий зарегистрированы временные профили интегрального излучения.

Исследовано временное поведение интенсивности излучения различных молекулярных полос для смеси 70%CO<sub>2</sub> + 30%N<sub>2</sub>.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00705 А.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ФЭУ - Фото Электронный Умножитель;
- ICCD - Intensifier Charge Coupled Device;
- CCD - Charge Coupled Device;
- V<sub>λ</sub> - объемная средняя плотность излучения;
- R<sub>н</sub> - нагрузочное сопротивление на ФЭУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов П.В., Лосев, С.А., Романенко, Ю.В. Измерение времени индукции реакции H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> инициированной ударной волной в стехиометрической смеси // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, №12 .2011. С.1–8.
2. Залогин Г.Н., Козлов П.В., Кузнецова Л.А., Лосев С.А., Макаров В.Н., Романенко Ю.В., Суржиков С.Т. Излучение смеси CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Ar в ударных волнах. Эксперимент и теория // Препринт Института механики МГУ №40-98. М.: МГУ. 1998. 85 с.

3. Kozlov P.V., Romanenko Y.V., Shatalov O.P. Radiation Intensity Measurement in Simulated Martian Atmospheres on the Double Diaphragm Shock Tube // Proc. '4th Int. Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry', Lausanne, Switzerland, 12–15 October 2010. (ESA SP-689, February 2011).
4. Dikalyuk A.S., Kozlov P.V., Romanenko Yu.V., Shatalov O.P., Surzhikov S.T. Nonequilibrium radiation behind the strong shock waves in marsian and titan atmospheres: Numerical rebuilding of experimental data // AIAA2514-795, Pp. 1–10.
5. Greenberg R. B., Cruden B. A., Grinstead J. H., Yeung D. Collection optics for imaging spectroscopy of an electric arc shock tube // Novel Optical Systems Design and Optimization XII. Edited by Koshel, R. John; Groot Gregory, G. Proceedings of the SPIE, Volume 7429, pp. 74290H-74290H-11 (2009).
6. Fujita K., Sato, S., Abe T., Ebinuma Y. Experimental Investigation of Air Radiation from Behind a Strong Shock Wave // Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.16, No.1, 2002.
7. Bremare N., Hyuny S-Y., Boubert P. Non-Equilibrium Radiation Calculations Behind Shock Waves in CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures-Rebuilding of TC2 Mars Test Cases //Proc. '4th Int. Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry', Lausanne, Switzerland, 12–15 October 2010 (ESA SP-689, February 2011).
8. Горелов В.А., Киреев А.Ю., Шиленков С.В. Неравновесное молекулярное излучение около космического аппарата при входе в атмосферу Марса //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т.4. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-09-28-001.pdf>
9. Горелов В.А., Комаров В.Н., Кузнецов М.М., Юмашев В.Л. О влиянии поступательной неравновесности на скорость молекулярной диссоциации в гиперзвуковой ударной волне // ПМТФ, 2001, т. 42, № 2.
10. Козлов П.В., Лосев С.А., Романенко Ю.В. Поступательная неравновесность во фронте ударной волны в смеси аргона и гелия // Письма в ЖТФ, 26(22): 2000. С.69–73.