

Experimental Investigation of Air Radiation up to 10 km/s

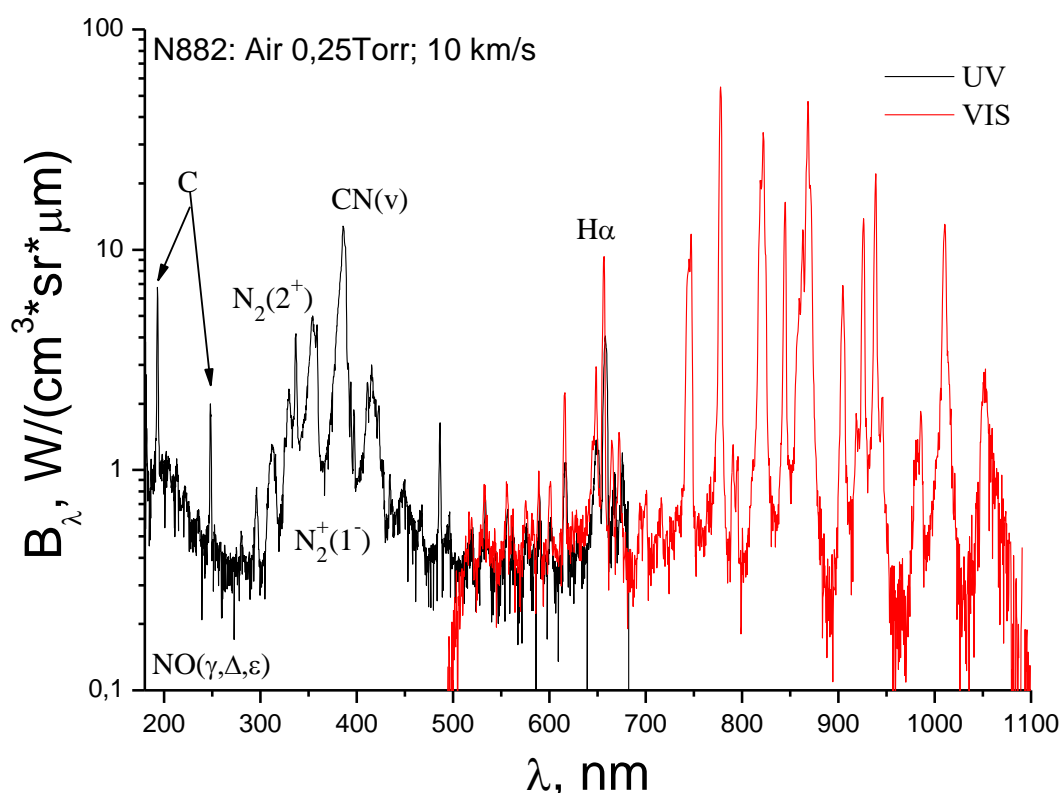
Pavel V. Kozlov

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

Abstract

The experimental results on the absolute measurements of spectral radiation of air obtained on the double diaphragm shock tubes of Laboratory of Kinetic Process in Gases of Institute of Mechanics MSU. Possibilities for the experimental study of shock-heated layer in the spectral range 190-1100 nm are considered. Temporal behaviors of radiation in certain narrow ranges of the spectrum presented.

Keywords: shock wave, absolute spectral radiance.



Spectral intensity of radiation of air heated by shock wave ($P_1=0,25$ Torr, $V_{sw}=10$ km/s).

УДК533.72, 533.9.082.5, 536.331

Экспериментальное исследование радиационных свойств воздуха за фронтом ударной волны при скоростях до 10 км/с

П. В. Козлов

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

kalevala@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты по исследованию радиационных характеристик ударно нагретого воздуха для скоростей 8-10 км/с. Измерения проводились на двух диафрагменной ударной трубе НИИ механики МГУ. Модернизированная система регистрации позволяла 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: ударная волна, спектральная плотность излучения.

1. Введение

Исследование радиационных характеристик ударно-нагретых газовых смесей моделирующих условия входа в атмосферу Земли с суборбитальными скоростями стало актуально в последнее время в связи с планируемыми полетами новых космических аппаратов к Луне и Марсу. Для новых спускаемых аппаратов размерами более 3-х метров величины лучистого и конвективного тепловых потоков могут быть сравнимы [1,2]. Тестирование вычислительных моделей, описывающих радиационные потоки при скоростях более 9 км/с, требует достоверных экспериментальных данных. Одним из основных источников этих данных служат результаты численной обработки экспериментов, выполненных на ударных трубах [3-5]. Параметры газа за фронтом ударной волны достаточно однородны поперек потока, что облегчает применение различных экспериментальных методик для диагностики потока.

2. Экспериментальная установка

Схема ударной трубы и системы сбора данных подробно описаны в работах [6,7]. В систему регистрации добавлены дополнительные каналы регистрации спектра и временной эволюции сигнала (Рис. 1). Дополнительный измерительный канал на базе спектрографа С-300 с дисперсией 1,75нм/мм регистрирует на ФЭУ-100 эволюцию во времени излучения за фронтом ударной волны одновременно со спектрографом В&М50 наФЭУ-83 в одном и том же измерительном сечении. На спектрографе В&М50 вместо регистрации временной эволюции может проводиться измерение интегральных по времени спектров излучения на ICCD камеру в отдельных спектральных диапазонах с высоким спектральным разрешением (0,12 нм). Для спектрального диапазона 650-1100 нм используется ФЭУ-83 с нагрузочным сопротивлением 1,1 кОм. Временное разрешение с ФЭУ-83 составляет ~250 нс, а для ФЭУ-100 с нагрузочным сопротивлением 510 Ом ~150 нс. Временное разрешение для ФЭУ-100 с нагрузочным сопротивлением 50 Ом составляет ~10 нс без учета пространственного разрешения этого канала определяемого диафрагмой d1 на собирающей линзе f1.

Спектральная ширина входных щелей s_1 спектрографов в кинетических экспериментах варьировалась из условий эксперимента от 100 до 200 мкм. При этом ширина выходной щели s_2 определяющая регистрируемый спектральный интервал $\Delta\lambda$ в каждом эксперименте, где измерялась временная эволюция излучения за фронтом ударной волны, указаны на рисунках (например, Рис. 8б).

Дополнительный канал, регистрирующий излучение в спектральном диапазоне 190-670 нм, собран на базе спектрографа Horiba CP140-1824 и стробируемой CCD линейки Hamamatsu S11156. Обозначение UV означает спектр, полученный на ультрафиолетовом спектрографе (190-670 нм), VIS – спектр, полученный на спектрографе видимого диапазона (500-1100 нм).

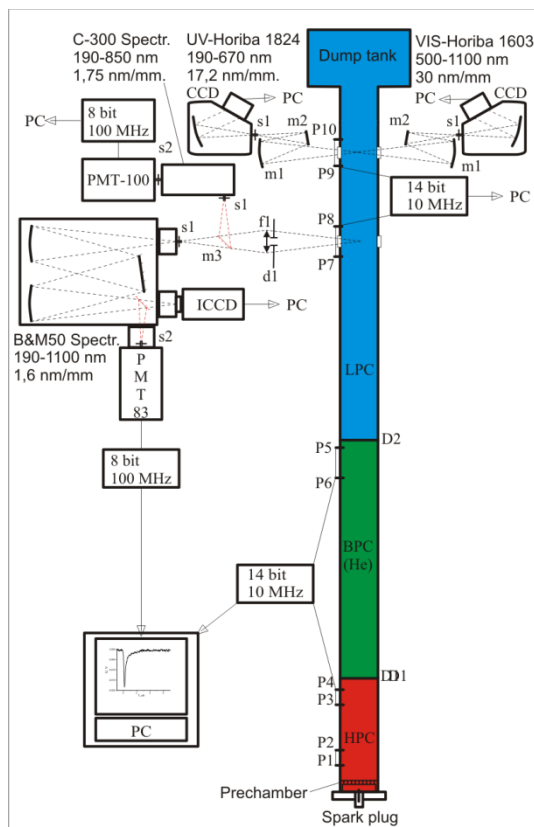


Рис. 1. Система регистрации на ударной трубе двухдиафрагменной (УТД)

Таким образом, система регистрации на установке УТД позволяет одновременно получать интегральный по пробке ударной волны спектр излучения в абсолютных единицах в спектральном диапазоне 190-1100нм, эволюцию во времени излучения в двух спектральных диапазонах с высоким временным и спектральным разрешением (кинетические измерения), либо вместо одного кинетического канала исследовать спектральный состав излучения с высоким разрешением с помощью ICCD камеры.

Помимо этого были проведены дополнительные исследования по оптимизации работы камеры высокого давления УТД. Найдены условия, при которых удалось увеличить скорость ударной волны с 7,6 км/с до 10 км/с (воздух $P_1=0,25$ Торр в камере низкого давления (CLP)).

Эксперименты на установке УТД могут проводиться не чаще одного раза в сутки, это ограничение связано только со степенью откачки паров воды после выстрела. Установка может обслуживаться одним человеком и требует небольшого количества расходных материалов. Система регистрации с использованием 4-х спектрографов с различным спектральным разрешением и возможностью проводить измерения эволюции во времени излучения позволяет быстро ее подстраивать для решения различных задач.

3. Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов получены спектральные плотности энергетической яркости (СПЭЯ), эволюция во времени излучения на двух длинах волн 420 и 777 нм и спектры излучения в узких спектральных интервалах с высоким спектральным разрешением. В табл. 1 приводятся данные условий экспериментов, проведенных для воздуха и смеси азота с кислородом в соотношении 4:1 при скоростях ударной волны ~7-10 км/с. В таблице приводятся: номер эксперимента; номер рисунка; состав исследуемого газа; скорость ударной волны в измерительном сечении между датчиками P7, P8 и P9, P10, регистрируемый спектральный диапазон для ФЭУ-100, ФЭУ-83 или ICCD камеры, в котором проводились временные или спектральные измерения; напряжение питания ФЭУ. Если в ячейках таблицы отсутствуют данные, то в эксперименте сигнал с ФЭУ не был зарегистрирован. В эксперименте N879 сигнал с CCD камер не был зарегистрирован.

Таблица 1

Условия экспериментов по излучению воздуха и смеси $N_2+O_2(4:1)$ при начальном давлении $P_1=0,25\text{Торр}$.

N	Рис. N	Состав	$V_{SW}^{7,8}$	$V_{SW}^{9,10}$	$\Delta \lambda$, нм	$U_{ФЭУ100}, \text{В}$	$\Delta \lambda$, нм	$U_{ФЭУ83}, \text{В}$
876	2	Воздух	7,58	7,58				
877	3	Воздух	8,93	8,93				
878	4	Воздух	9,09	9,09	420±0,37	1500	777±1,33	1600
879	5	Воздух	9,62	9,62	420±0,37	1700	777±1,33	1600
880	6	Воздух	8,06	8,06	420±0,37	1700	777±1,33	1600
881	7	Воздух	7,14	7,14	420±0,37	1700	777±1,33	1600
882	8	Воздух	10,0	10,0	420±0,37	1700	777±1,33	1600
883	9	Воздух	9,62	9,62	420±0,37	1700	777±1,33	1600
884	10	N_2+O_2	10,0	9,62	420±0,37	1700	777±1,33	1600
885	11	N_2+O_2	9,62	9,26	420±0,37	1700	777±1,33	1600
886	12	N_2+O_2	6,76	6,58	420±0,37	1700	777±1,33	1600
887	13	N_2+O_2	9,26	9,09	420±0,37	1700	777±1,33	1600
888	14	N_2+O_2	8,85	8,70	420±0,37	1700	777±1,33	1600
889	15	N_2+O_2	9,62	9,62	“0”	1700	375-400	ICCD
890	16	Воздух	9,71	9,71	“0”	1700	335-360	ICCD
891	17	Воздух	9,26	9,26			300-325	ICCD
892	18	N_2+O_2	9,1	9,26			312-337	ICCD
893	19	$N_2+O_2(0,2\text{Торр})$	10	10			375-400	ICCD
894	20	Воздух (0,2Торр)	10,2	10,2	313±5,25	1700	375-400	ICCD

Разброс скоростей в экспериментах обусловлен двумя причинами. В случае, когда скорости ударной волны меньше 9,5 км/с, в камере высокого давления был не оптимальный состав смеси водорода, кислорода и гелия. Если скорость выше 9,6 км/с, то разброс вызван различием в толщине используемых диафрагм, глубине насечек, окружающей среды, точностью измерения начального давления. Разница в скоростях в разных измерительных сечениях, по-видимому, обусловлена замедлением скорости ударной волны вдоль по потоку.

На Рис. 2 представлен спектр излучения воздуха интегральный по длине пробки. Спектр получен в условиях идентичных условиям эксперимента N691 на Рис.1 из работы [8], который зарегистрирован камерой ICCD. Следует отметить очень хорошее совпадение формы и абсолютных значений интенсивностей излучения.

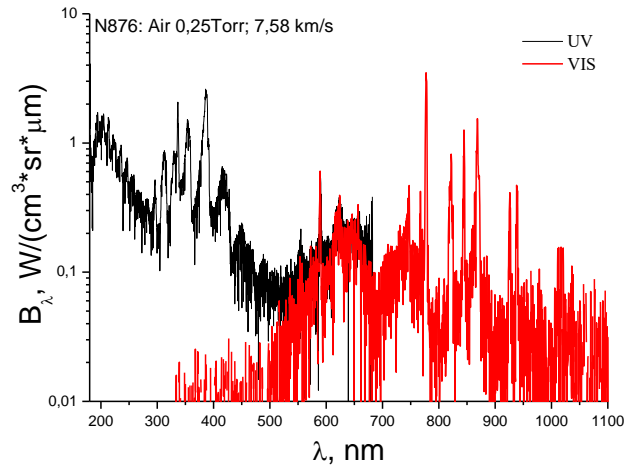


Рис. 2. Эксперимент №876: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 7,58км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр

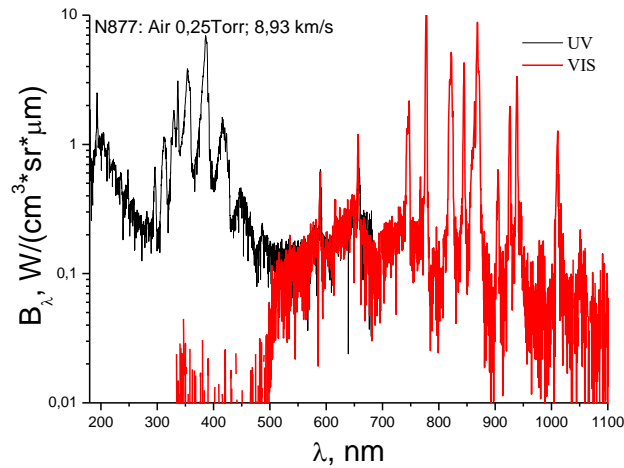


Рис. 3. Эксперимент №877: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 8,93км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр

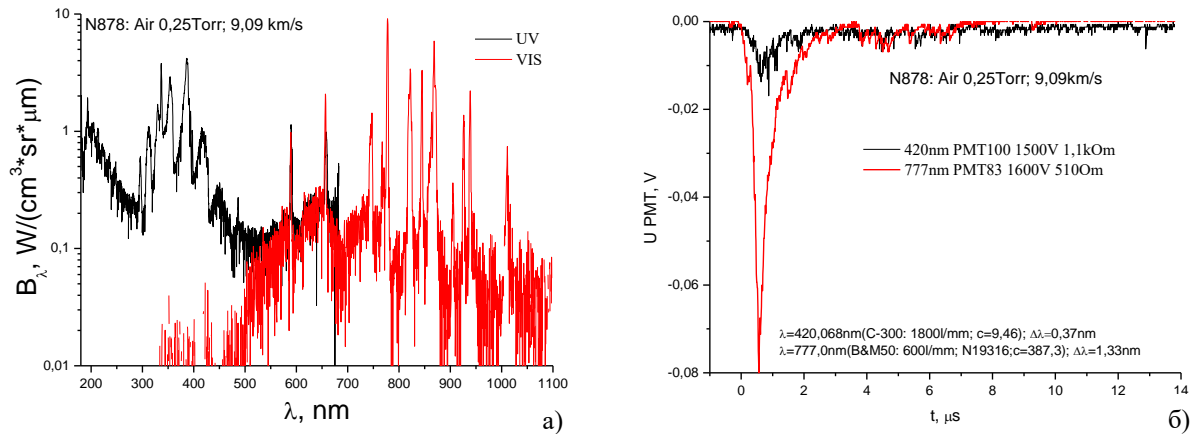


Рис. 4. Эксперимент №878: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 9,09км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм

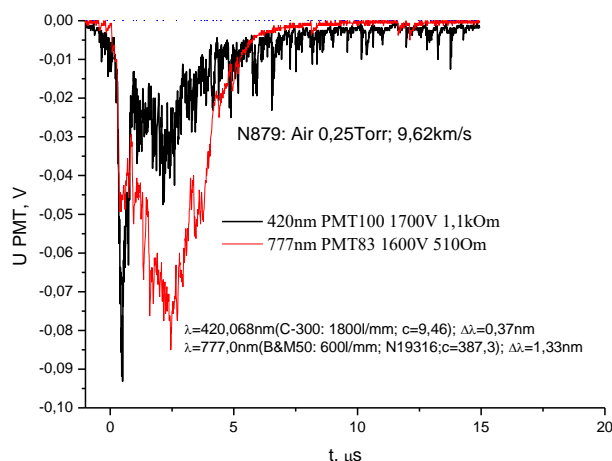


Рис. 5. Эксперимент №879: временная зависимость излучения воздуха при скорости УВ 9,62км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр на двух длинах волн 420 и 777 нм

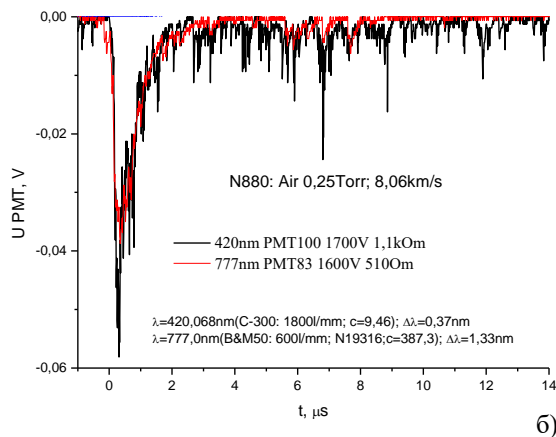
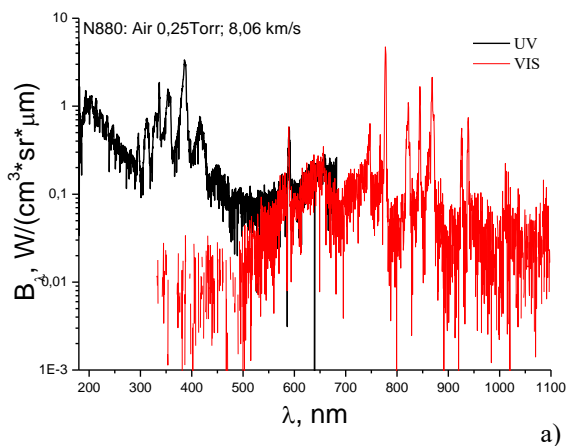


Рис. 6. Эксперимент №880: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 8,06км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм

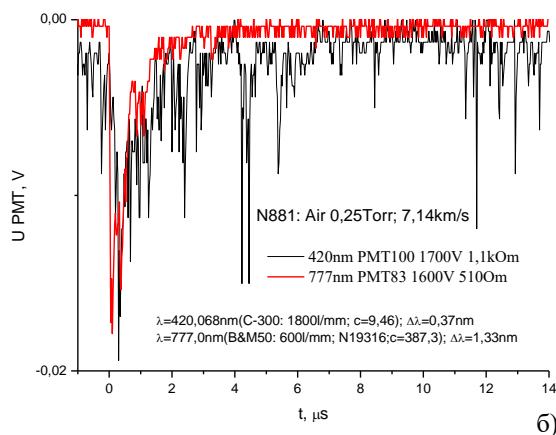
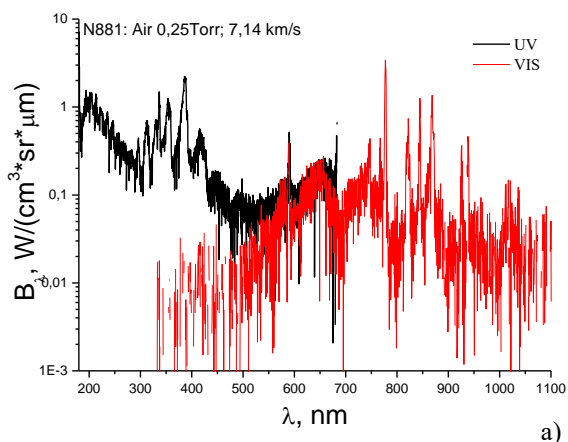


Рис. 7. Эксперимент №881: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 9,09км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм

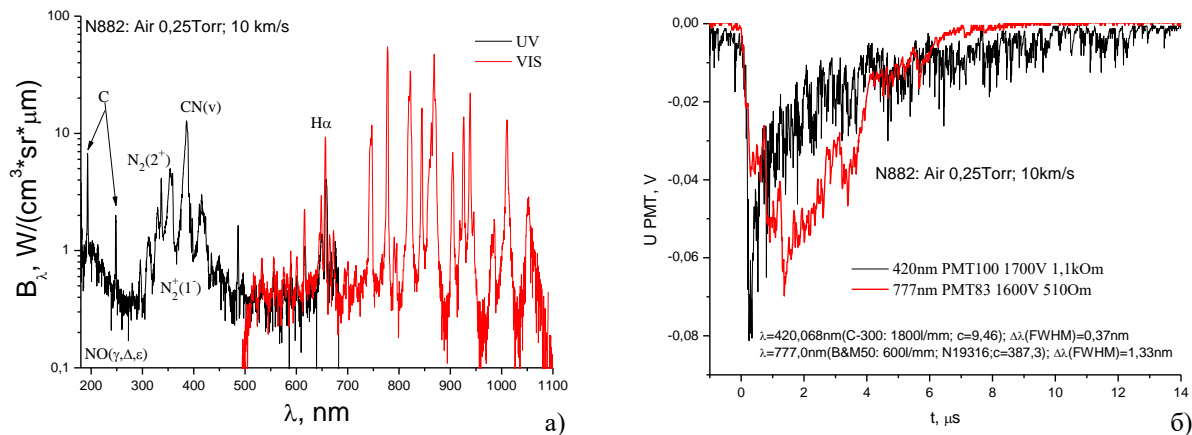


Рис. 8. Эксперимент №882: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 10 км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм.

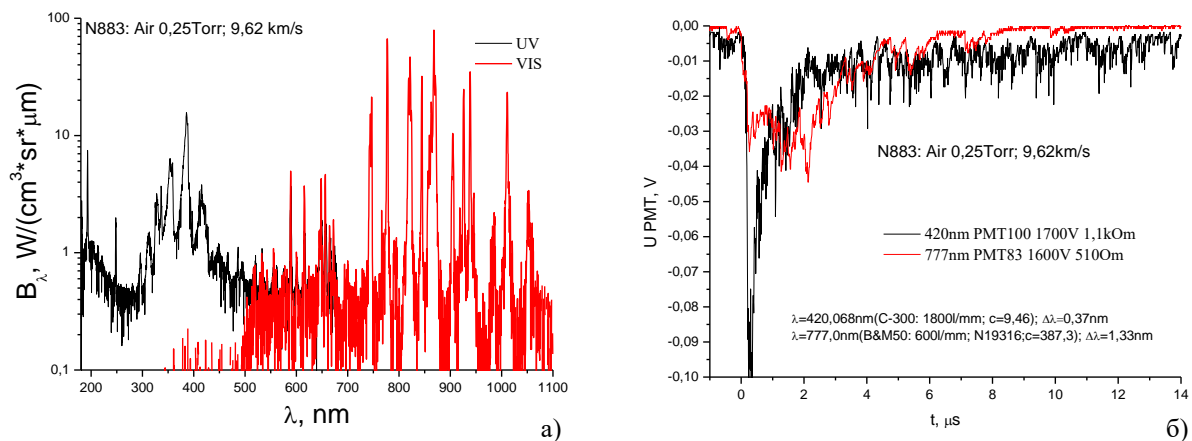


Рис. 9. Эксперимент №883: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 9,62км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм

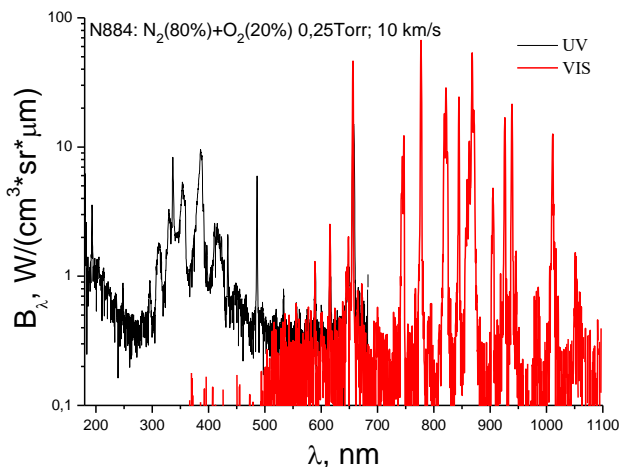


Рис. 10. Эксперимент №884: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 10 км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр

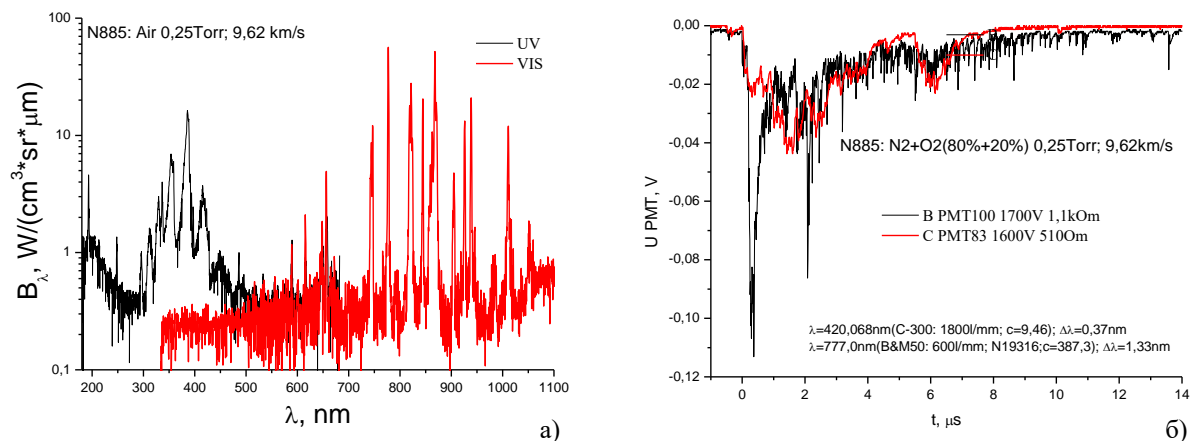


Рис. 11. Эксперимент №885: а) СПЭЯ смеси $\text{N}_2+\text{O}_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 9,62км/с и начальном давлении $P_1=0,25\text{Торр}$; б) временная зависимость излучения УВ смеси $\text{N}_2+\text{O}_2(80\%+20\%)$ на двух длинах волн 420 и 777 нм

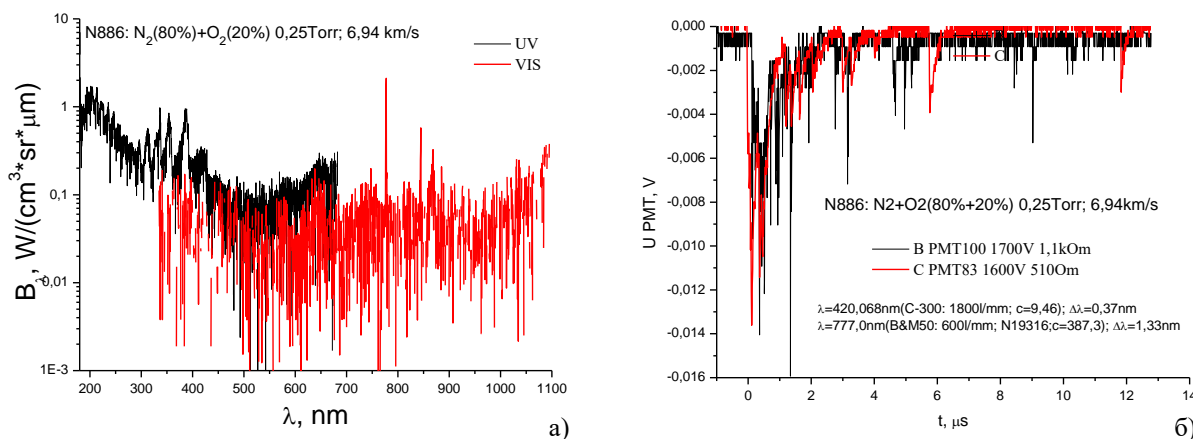


Рис. 12. Эксперимент №886: а) СПЭЯ смеси $\text{N}_2+\text{O}_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 6,94км/с и начальном давлении $P_1=0,25\text{Торр}$; б) временная зависимость излучения УВ смеси $\text{N}_2+\text{O}_2(80\%+20\%)$ на двух длинах волн 420 и 777 нм

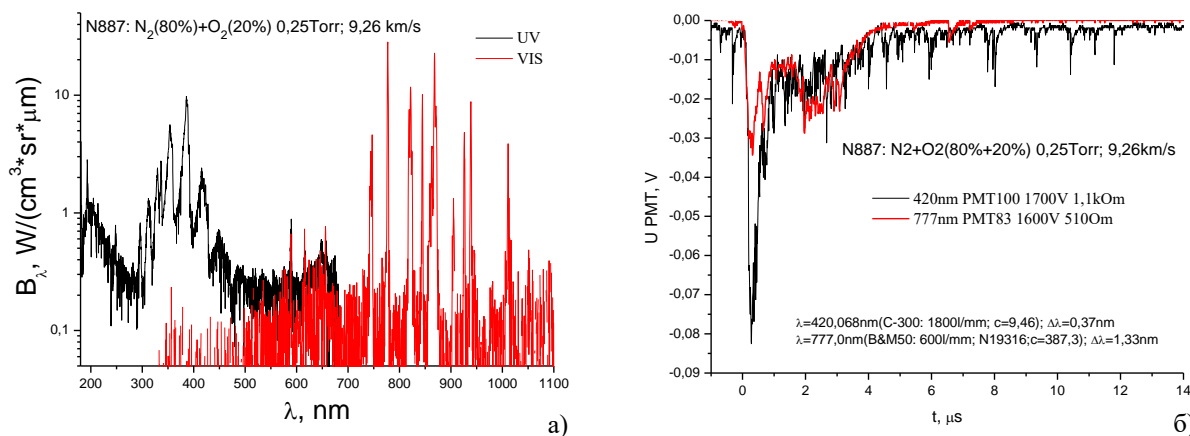


Рис. 13. Эксперимент №887: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 9,26км/с и начальном давлении $P_1=0,25\text{Торр}$; б) временная зависимость излучения УВ в воздухе на двух длинах волн 420 и 777 нм

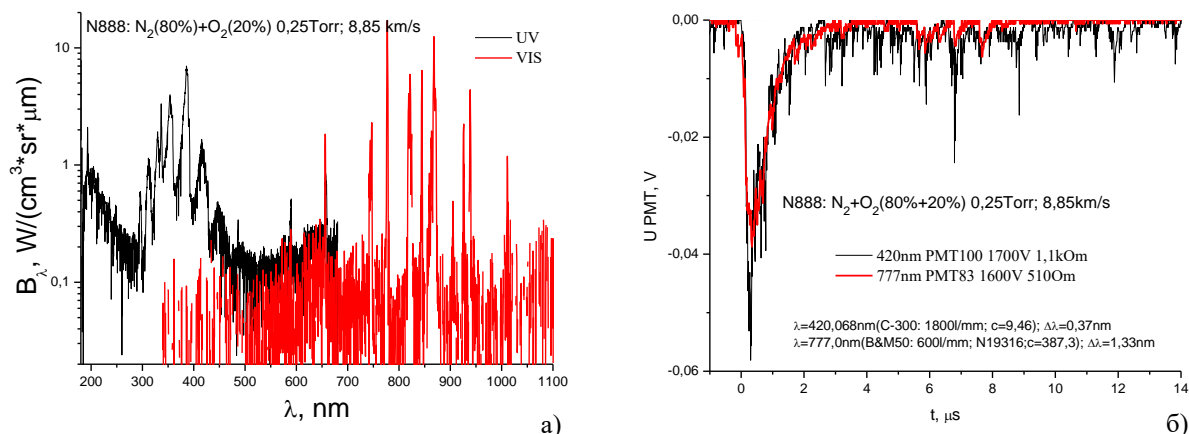


Рис. 14. Эксперимент №888: а) СПЭЯ смеси $N_2+O_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 8,85км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) временная зависимость излучения УВ смеси $N_2+O_2(80\%+20\%)$ на двух длинах волн 420 и 777 нм

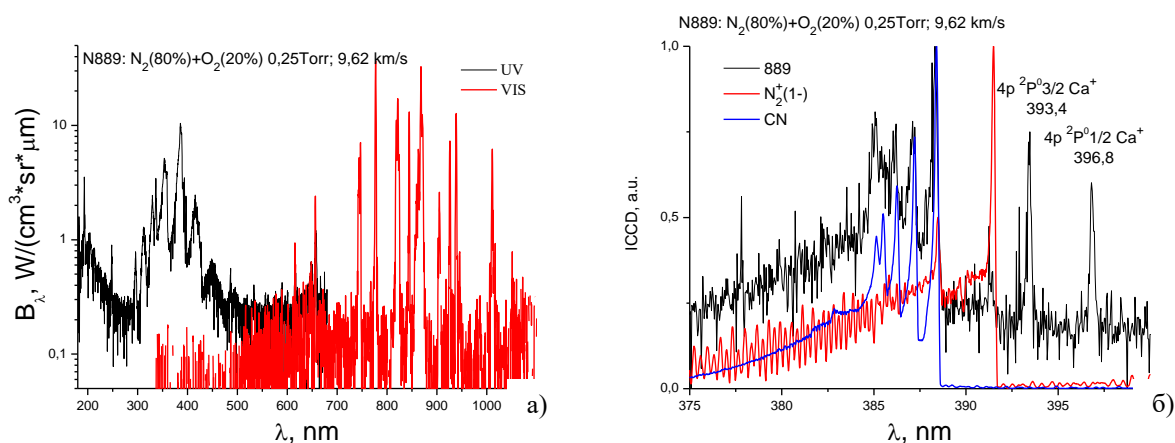


Рис. 15. Эксперимент №889: а) СПЭЯ смеси $N_2+O_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 9,62км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 375-400 нм

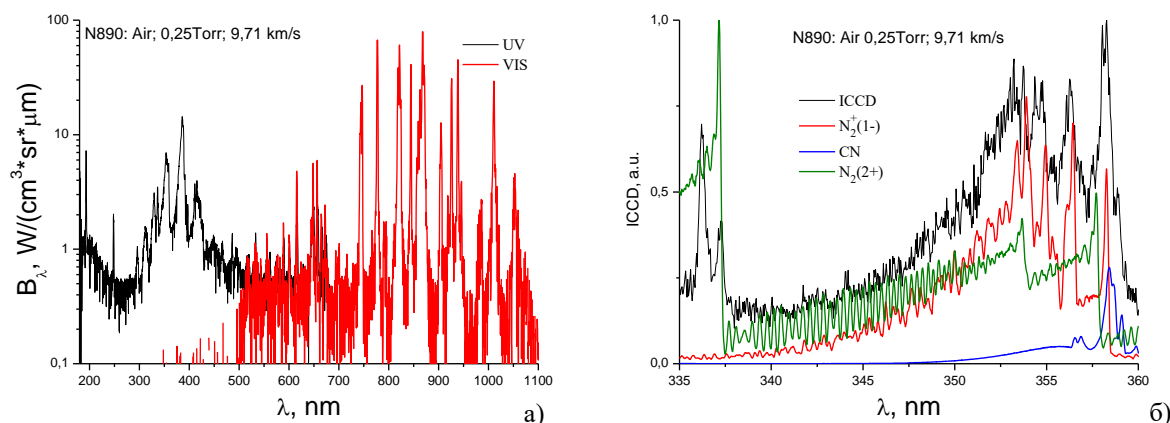


Рис. 16. Эксперимент №890: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 10 км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) Спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 335-360 нм

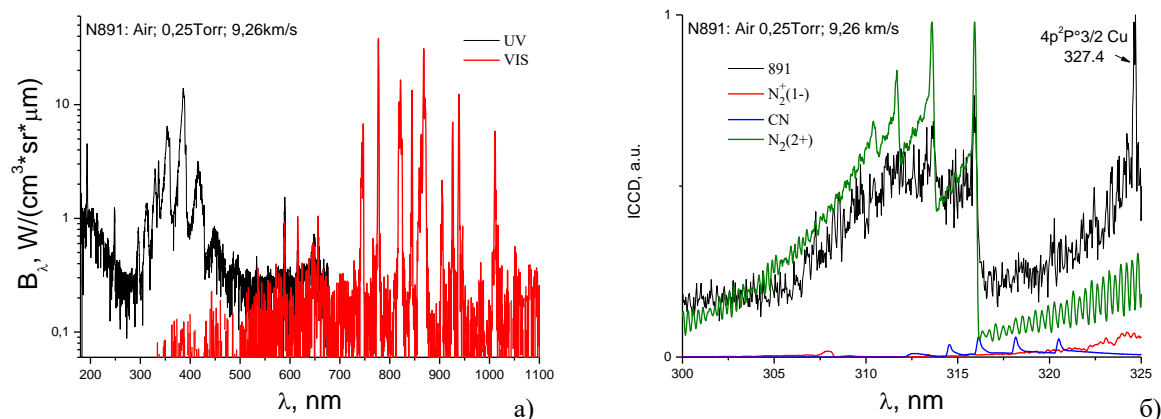


Рис. 17. Эксперимент №891: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 9,26 км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 375-400 нм

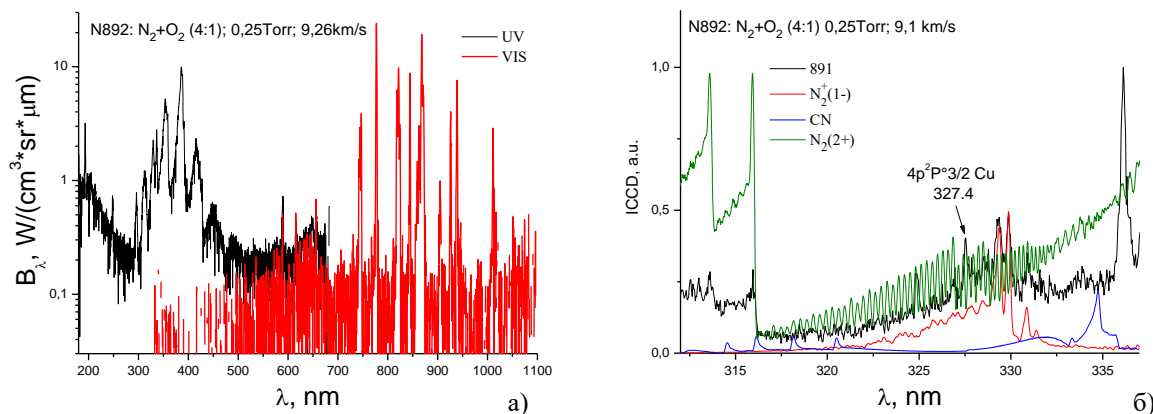


Рис. 18. Эксперимент №892: а) СПЭЯ смеси $N_2+O_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 9,26 км/с и начальном давлении $P_1=0,25$ Торр; б) Спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 312-337 нм

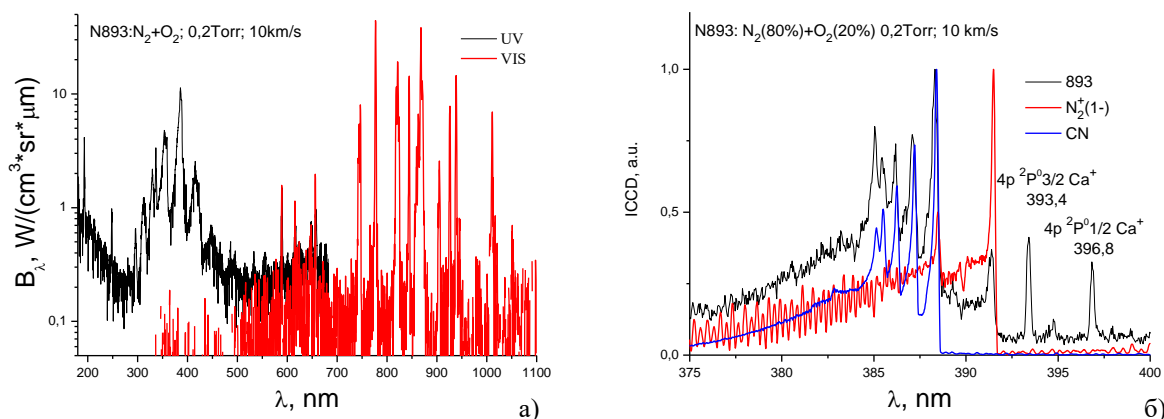


Рис. 19. Эксперимент №893: а) СПЭЯ смеси $N_2+O_2(80\%+20\%)$ при скорости УВ 10 км/с и начальном давлении $P_1=0,2$ Торр б) спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 375-400 нм

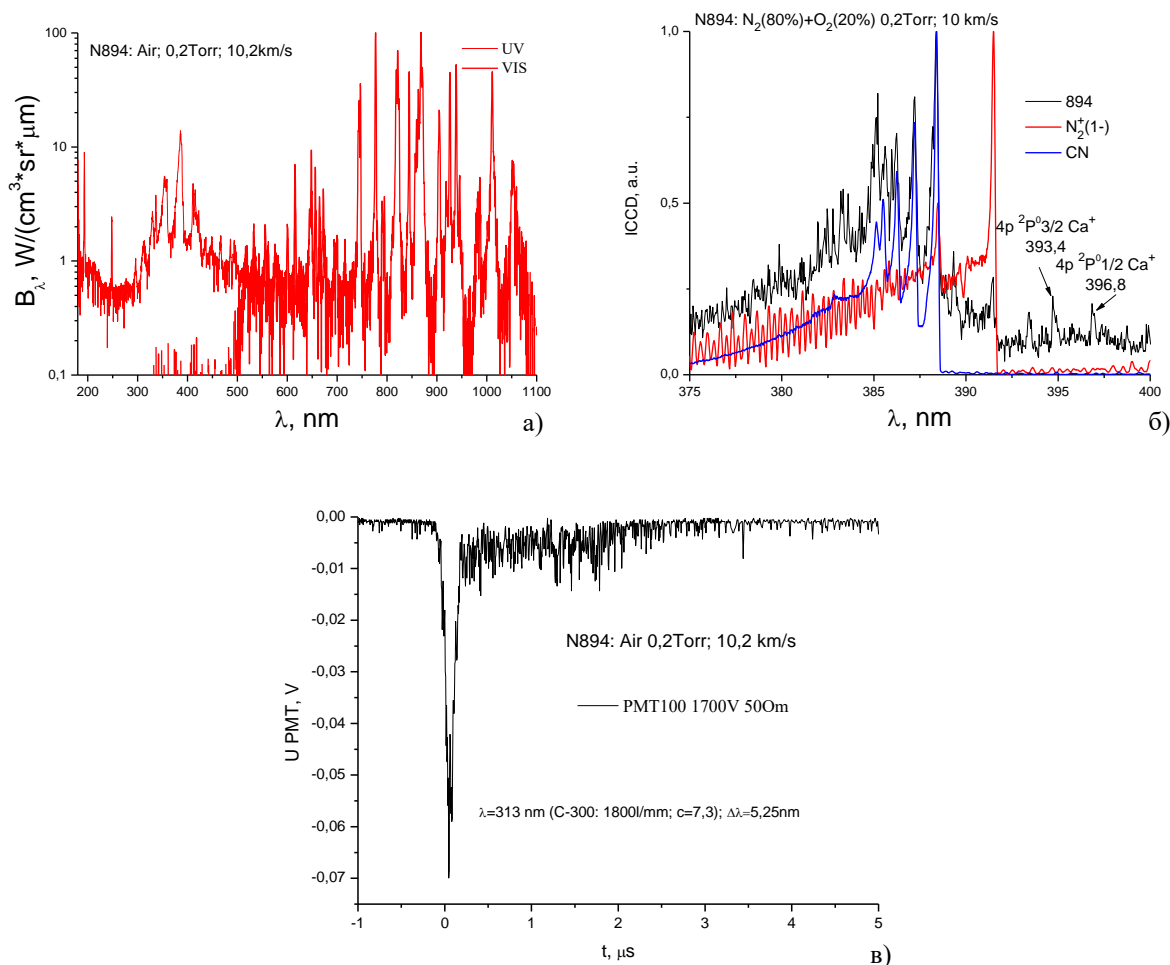


Рис. 20. Эксперимент №894: а) СПЭЯ воздуха при скорости УВ 10,2 км/с и начальном давлении $P_1=0,2\text{Torr}$; б) спектр излучения с высоким спектральным разрешением в диапазоне длин волн 375-400 нм; в) временная зависимость излучения УВ в воздухе на длине волны 313 нм

Временные зависимости интенсивностей излучения приведены в вольтах, снимаемых с нагрузочного сопротивления ФЭУ. Так, как для каждого эксперимента известно, напряжение питания и размер входных $s1$ и выходных $s2$ щелей то амплитуды излучения могут быть пересчитаны в интенсивности в абсолютных единицах. Аналогично спектры, полученные с высоким спектральным разрешением (Рис. 15б–Рис. 20б) и представленные в относительных единицах, могут быть пересчитаны в абсолютные единицы СПЭЯ, на этих же рисунках приведены равновесные спектры излучения $\text{N}_2(2^+)$, $\text{N}_2^+(1^-)$ и CN (фиолетовая система) при температуре 10000К.

4. Обсуждение результатов

Рассмотрим характерные особенности изменения в спектрах и временной эволюции излучения за фронтом ударной волны при увеличении скорости от 7 до 10 км/с.

При скоростях менее 8,5 км/с в спектрах излучения наблюдаются только молекулярные полосы молекул N_2 (275-400 нм), NO (190-300 нм), радикала CN (330-425 нм) и молекулярного иона N_2^+ (300-500 нм), группа атомарных линий азота 857-867 нм, линия 1011 нм и атомарные линии кислорода 557, 777, 822, 845 и 926 нм. В спектрах при всех скоростях практически всегда присутствуют дублеты линий Na (589 нм), Li (671 нм) и K (766, 770 нм), линии ионов кальция (393 и 397 нм) и линий меди (327 нм). Возможно, излучение линий щелочных металлов и кальция связано с люминесценцией кварцевого стекла окон наблю-

дения под действием сильного излучения из области вакуумного ультрафиолета (<185 нм), возникающего за фронтом ударной волны [9]. С повышением скорости УВ повышается интенсивность молекулярных полос $N_2(2^+)$, $N_2^+(1^+)$ и CN(фиолетовая система), а интенсивность полс NO изменяется незначительно. При скоростях выше 8,5 км/с в спектрах идентифицируются атомарные линии азота: 601, 649, 664, 747, 822, 939, 986, 1054 нм. Также наблюдаются атомарные линии углерода 193 и 247 нм.

Причины появления в спектрах излучения полос CN (фиолетовая система) и атомарных линий углерода связаны с присутствием в окружающем воздухе CO_2 (до 0,3%) и углерод содержащих примесей в смеси N_2+O_2 (~0,001%). Также влияет использование технических газов в составе толкающего газа в камере высокого давления, в которых содержание углерод содержащих компонент может достигать 0,1%. После эксперимента водяные пары и углерод содержащих примеси конденсируются на стенках ударной трубы, которые довольно сложно поддаются откачке. Из экспериментов установлено, что пары воды откачиваются за время не менее чем 6 часов, что хорошо контролируется по линиям $H\alpha$ и $H\beta$ водорода. Для откачки и удаления со стенок ударной трубы углерод содержащих примесей требуются дополнительные меры. Похожие проблемы существуют и на других установках, например в центре NASA на электроразрядной трубе EAST [10,11]. Для удаления углерод содержащих примесей можно использовать генератор атомарного кислорода как в [10]. Можно использовать чистые газы для составления смеси в камере высокого давления и проводить периодически выстрелы по смеси аргона с кислородом для очистки стенок ударной трубы от примесей.

Однако как видно из Рис. 15б-Рис. 20б влияние циана на спектр существенно только в области 370-420 нм, поэтому при обработке спектров можно исключить из обработки эту область спектра. Влияние циана на кинетику протекания физико-химических процессов в ударно-нагретом воздухе, скорее всего, мало, так как концентрация циана не превышает 10^{15} см^{-3} при этих условиях [11].

5. Заключение

Продемонстрированы возможности по исследованию радиационных свойств ударно-нагретого воздуха на установке УТД НИИ механики МГУ для скоростей до 10 км/с.

Установка позволяет регистрировать спектры излучения в диапазоне 190-1100 нм с высоким спектральным и временным разрешением.

Автор выражает сердечную благодарность за плодотворное сотрудничество Романенко Юрию Валентиновичу. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00705.

Литература

1. Суржиков С. Т., Шувалов М. П. Анализ радиационно-конвективного нагрева четырех типов спускаемых космических аппаратов //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/>
2. Власов В. И., Залогин Г. Н., Ковалев Р. В., Чураков Д. А. Лучисто-конвективный теплообмен спускаемого аппарата с разрушаемой тепловой защитой//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-2/articles/306/>
3. Dikalyuk A.S., Kozlov P.V., Romanenko Y.V., Shatalov O.P., Surzhikov S.T. /Nonequilibrium spectral radiation behind the shock waves in Martian and Earth atmospheres// *44th AIAA Thermophysics Conference, 2013/ AIAA paper*. 2013, no. 2013-2505. P.1– 10.
4. Dikalyuk A.S., Kozlov P.V., Romanenko Y.V., Shatalov O.P., Surzhikov S.T. /Nonequilibrium radiation behind the strong shock waves in Martian and Titan atmospheres: Numerical rebuilding of experimental data// *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA paper*. 2012, no. 2012-0795. P.1–10.
5. Излучение смеси CO_2-N_2 -ар в ударных волнах: эксперимент и теория / П. В. Козлов, Л. А. Кузнецова, С. А. Лосев и др. // *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71, № 6. С. 10–16.

6. 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).
7. Козлов П. В., Романенко Ю. В. Определение положения газодинамического фронта ударной волны//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/220/>
8. Козлов П. В., Романенко Ю. В. Исследование временных характеристик излучения ударно нагретого воздуха//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/221/>
9. Быкова Н. Г., Герасимов И. Г., Забелинский И. Е., Ибрагимова Л. Б., Шаталов О. П. Исследование ударно-нагретого воздуха в спектральной области 120-900 нм: панорамный спектр и эволюция излучения за фронтом ударной волны//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/114/>
10. J. H. Grinstead, M. C. Wilder, D. C. Reda, C. J. Cornelison, B. A. Cruden and D. W. Bogdanoff. Shock-tube and ballistic range facilities at NASA Ames research center. Technical Report RTO-EN-AVT-186, NATO, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhodes Saint Genese, Belgium, 2010.
11. Johnston, C.O., A Comparison of EAST Shock-Tube Radiation Measurements with a New Radiation Model, AIAA Paper 2008-1245, 2008.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2016 г.