

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ
(НИИ механики МГУ)

УДК 539.196+535.34+533.6.071+533.6.078

№ госрегистрации № У 93101

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИИ механики МГУ
действительный член РАЕН

_____Ю.М. Окунев

«__» _____ 2017 г.

ОТЧЕТ № 5349

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Проведение экспериментов по измерению абсолютной интенсивности
излучения УВ на установках УТС и УТД в воздухе и в смеси
CO₂+N₂ за фронтом сильных ударных волн**

по темам:

ЭКСПЕРИМЕНТ

и

**ДВИЖЕНИЕ СПЛОШНЫХ СРЕД С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ
ПРЕВРАЩЕНИЯМИ**

Заместитель директора института по НИР

(д. ф.-м. н.) _____Н.А. ОСТАПЕНКО

Заведующий лабораторией 109

(к. ф.-м. н.) _____О.П. ШАТАЛОВ

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Заведующий

лабораторией 109

О.П. Шаталов

научный сотрудник

П.В. Козлов

научный сотрудник

И.Е. Забелинский

научный сотрудник

Н.Г. Быкова

ведущий инженер

Ю.В. Акимов

Рецензент:

Ведущий научный сотрудник

Фокеев В.П.

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 2 раздела, 36 страниц, 25 рисунков, 2 таблицы, 32 использованных источников.

Ключевые слова: УДАРНАЯ ТРУБА, УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ, ЭКСПЕРИМЕНТ абсолютное излучение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

Объект исследования: высокотемпературные газовые потоки.

Цели работы: исследование радиационных свойств воздуха и смеси моделирующей атмосферу Марса при скоростях ударной волны 4-10 км/с

Методология проведения работы:

при проведении работ использованы современные представления о процессах, протекающих за фронтом ударной волны в высокотемпературном воздухе и смесях моделирующих атмосферу Марса.

На ударных трубах УТД и УТС Института механики МГУ за фронтом сильных ударных в смесях, моделирующих марсианскую ($\text{CO}_2\text{-N}_2$) и воздушную ($\text{N}_2\text{-O}_2$), атмосферы, измерено относительное и абсолютное излучение в видимом, ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Начальное давление перед фронтом ударной волны составляло 0,3 - 1 Торр, скорость ударной волны достигала 10 км/с.

Результаты работы:

Получены экспериментальные данные о свойствах неравновесного излучения оксида азота для скоростей 4-10 км/с; проведено качественное и количественное сравнение модельными расчетами.

Область применения:

Физическая газодинамика, спектральные измерения высокотемпературных потоков газа и плазмы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Экспериментальное исследование радиационных свойств воздуха за фронтом ударной волны при скоростях до 10 км/с.....	6
Методы регистрации спектральных и временных характеристик излучения на ударных трубах.....	6
Модернизация диафрагменного узла	9
Описание ударной трубы УТД и системы регистрации	11
Результаты экспериментов	15
2. Эксперименты по измерению абсолютной интенсивности излучения УВ на установке УТС в смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ за фронтом сильных ударных волн	24
Описание установки УТС.....	24
Методики измерений.....	25
Результаты экспериментов	29
Заключение	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	34

ВВЕДЕНИЕ

Оценка воздействия тепловых и радиационных потоков на поверхность спускаемого аппарата в смесях N_2-O_2 и CO_2-N_2 для маневра торможения в настоящее время представляет интерес в связи с проектами миссий на Землю, Марс и Венеру. Для спускаемых аппаратов размерами более 3-х метров величины конвективного и лучистого тепловых потоков могут быть сравнимы [1,2]. Тестирование расчетных моделей, описывающих радиационные потоки, требует достоверных экспериментальных данных в широком диапазоне скоростей и давлений. Одним из основных источников этих данных служат результаты моделирования экспериментов выполненных на ударных трубах[3-9].

Настоящий отчет посвящен исследованию радиационных характеристик ударных волн в газах за фронтом сильных ударных волн. Проведены тестовые эксперименты на ударных трубах УТД и УТС по измерению абсолютных интенсивностей излучения и временных характеристик излучения в смесях N_2-O_2 и CO_2-N_2 в видимом, ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах длин волн.

Измерены временные характеристики излучения воздуха и смеси CO_2-N_2 в ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн, и смеси CO_2-N_2 для «нулевого порядка» - интеграл по спектру. Скорость ударной волны была 4.0-10.5 км/с.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 10 КМ/С

Методы регистрации спектральных и временных характеристик излучения на ударных трубах

Параметры газа за фронтом ударной волны достаточно однородны поперек потока, что облегчает применение различных экспериментальных методик для диагностики ударных волн. Традиционно при регистрации радиационных свойств ударной волны конструкцию спектрографа выбирают так, чтобы получать как пространственное, так и спектральное разложение излучения пробки ударной волны. Пространственная картина проецируется на выходную плоскость спектрографа, таким путем регистрируются спектры в нескольких пространственных точках одновременно. Спектральное и пространственное изображение в выходной плоскости спектрографа записывается стобируемой ICCD камерой за короткий промежуток времени (0,1-1 мс). Это позволяет получить мгновенную картину спектрального распределения излучения ударной волны в различных сечениях (рисунки 1.1 и 1.2). Такой способ называется методом спектроскопии изображения или 2-D спектроскопии. Эта методика реализована в экспериментах на ударных трубах в Исследовательском центре NASA Ames [10], Университет Квинсленда [11] и Chofu аэрокосмический центр Японии [12].

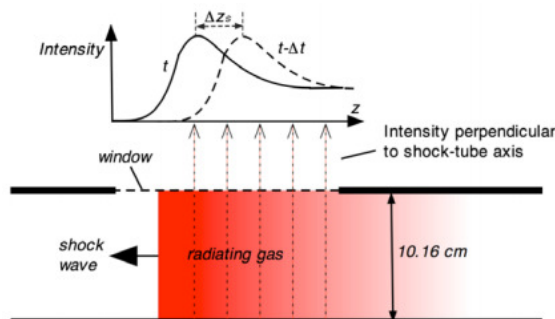


Figure 2. Schematic (not to scale) of the EAST shock-tube measurements simplified to the configuration modeled in the present analysis.

Рисунок 1.1 Схема методики 2-D спектроскопии. Рисунок взят из работы [10]

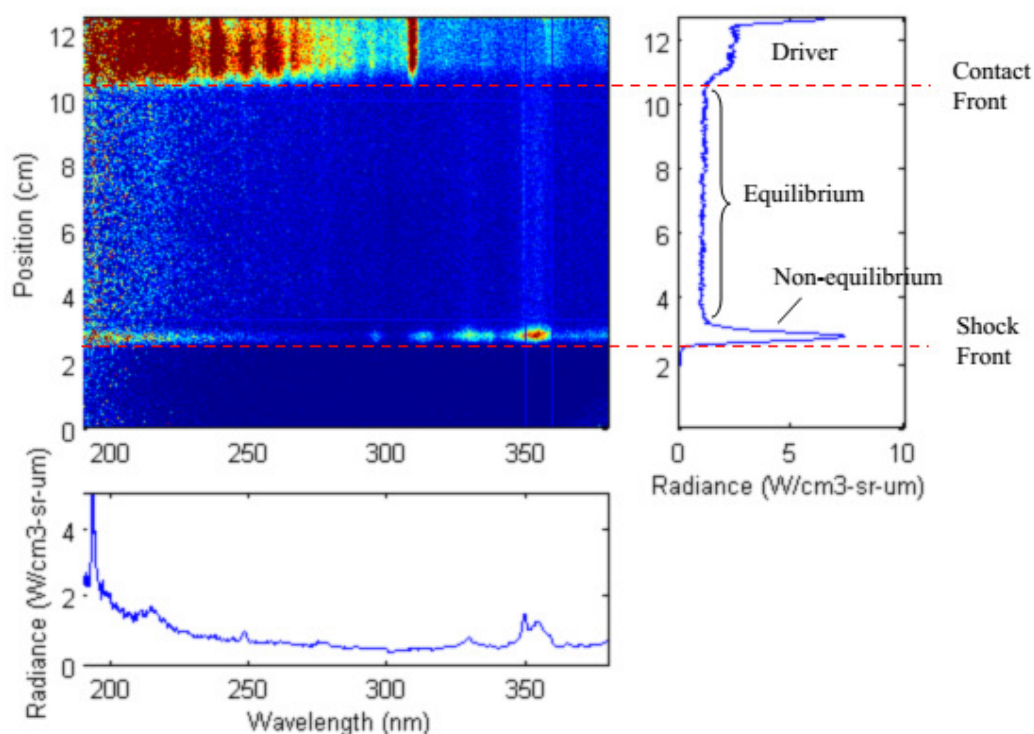


Рисунок 1.2 Пример спектров и пространственного распределения интенсивности излучения получаемых методом 2-D спектроскопии. Рисунок взят из работы [10]

В наших экспериментах регистрируется интегральное распределение интенсивности излучения ударной волны в широком спектральном диапазоне (110-1100нм) прошедшей мимо измерительного сечения [23, 24]. В интересующих областях спектра регистрируется временное распределение спектральной плотности с высоким временным разрешением (~20 нс пространственное разрешение оптической схемы и полоса пропускания системы регистрации). Поэтому временное разрешение $\Delta\tau$ (или пространственное $\Delta x = \Delta\tau \times V_{sw}$) ограничено только кривизной фронта ударной волны, которая определяется согласно [14] по формуле:

$$\delta = 0,45 \times \sqrt{\frac{R[\text{cm}]}{P_1[\text{Torr}]}} [\text{mm}] \quad (1.1)$$

Значение, рассчитанное по формуле (1.1) хорошо согласуется с экспериментальными данными из работы [15], зарегистрировавшими интегральное по длинам волн излучение ударной волны за 10 нс показано на рисунке 1.3.

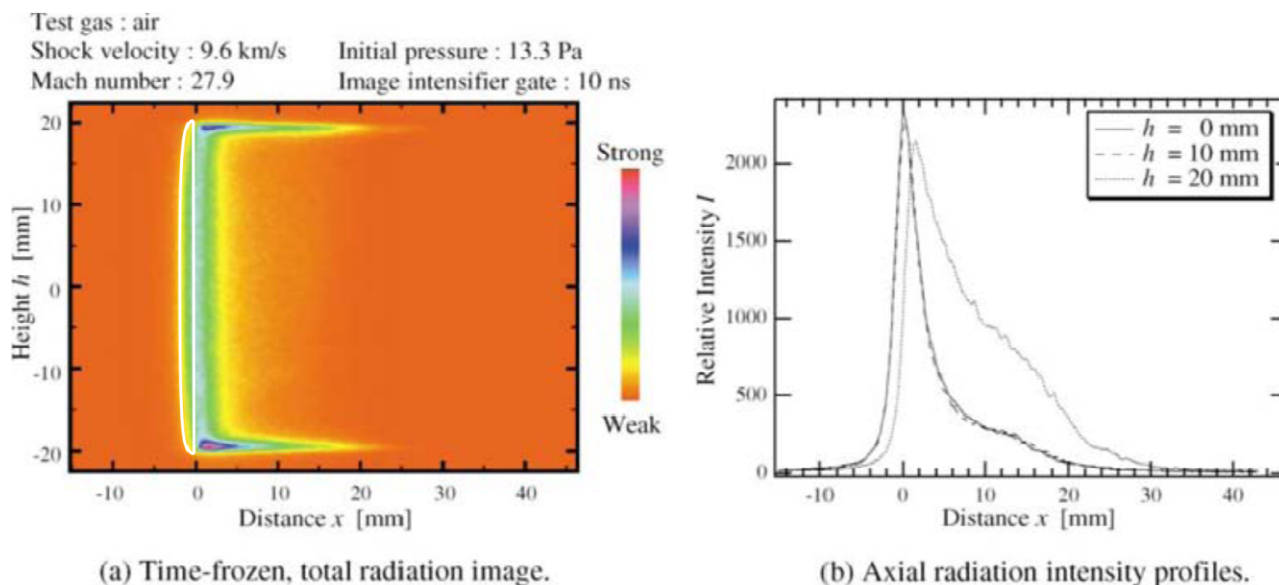


Рисунок 1.3 Фотография интегрального по длинам волн (200-850нм) излучения (а) полученного в работе [15] за 10 нс и аксиального профиля распределения интенсивностей (b). Параметры ударной волны указаны на рисунке.

В наших экспериментах для начального давления 0,25 Торр кривизна фронта составляет $\delta=1,4$ мм (для скорости ударной волны 10 км/с временное разрешение $\Delta\tau\sim 140$ нс), а для начального давления 1 Торр кривизна уже будет порядка $\delta=0,7$ мм, что соответствует временному предельному временному разрешению на скорости ударной волны 6 км/с $\Delta\tau\sim 40$ нс. Следовательно, при проведении кинетических измерений за фронтом ударной волны необходимо, чтобы длина неравновесных процессов была больше кривизны фронта ударной волны.

Метод 2-D спектроскопии имеет большой потенциал для исследования радиационных процессов в ударных волнах. Он позволяет за один эксперимент зарегистрировать спектральное распределение интенсивности излучения, как в равновесной, так и неравновесной зонах ударно сжатого слоя. Тем не менее, метод имеет некоторые недостатки, такие как зависимость чувствительности ICCD камеры от длительности времени экспозиции [10]. Кроме того, если длительность неравновесного излучения меньше, чем длительность экспозиции ICCD камеры то становится трудно

интерпретировать неравновесную кинетику излучения за фронтом ударной волны. В недостаточно интенсивных областях спектра авторы работающие методом 2-D спектроскопии обычно используют длительности экспозиции 0,5-1 мкс. Для моделирования неравновесных процессов в таких условиях авторы [13] вводят так называемую «неравновесной метрику». Введение этой метрики эквивалентно режиму регистрации интегрального излучения проходящего мимо измерительного сечения на ICCD приемник, что эквивалентно методике наших измерений на CCD линейку.

В представленных экспериментах, длительность неравновесного излучения находится в диапазоне от 40 нс до 2 микросекунд. Таким образом, использование измерительного канала, который регистрирует излучение ударной волны на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) дает дополнительную информацию о кинетических процессах в неравновесной зоне. Эти данные не могут быть получены методом 2-D спектроскопии при временах экспозиции более 100 нс.

В данной работе представлены: описание двухдиафрагменной ударной трубы; системы регистрации; интегральная абсолютная интенсивность излучения воздуха; временная эволюция излучения оксида азота для скоростей 4-10 км/с.

Модернизация диафрагменного узла

Для более стабильной работы ударной трубы была изменена конструкция диафрагменного узла в КВД и КПД. Если диаметры диафрагменного узла и ударной трубы совпадают, то при раскрытии диафрагмы на четыре лепестка при некоторых режимах происходит его закручивание у места крепления. В некоторых режимах возможен отрыв лепестков (р 1.4).

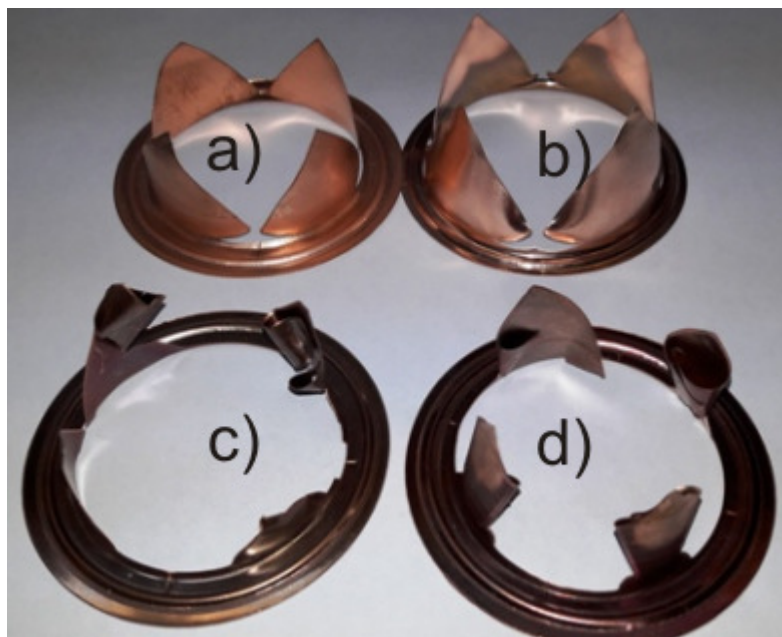


Рисунок 1.4 Фотография диафрагм: а) - хорошо раскрытая диафрагма диаметр кассеты равен диаметру трубы; б) - хорошо раскрытая диафрагма конусный диафрагменный узел; в) - часть лепестков унесена потоком; д) – закручивание лепестков потоком.

Для устранения этого были изготовлены новые диафрагменные узлы конической формы рисунок 1.5. В результате проведенных экспериментов практически на всех режимах работы ударной трубы закручивания или отрыва лепестков диафрагмы не наблюдалось.

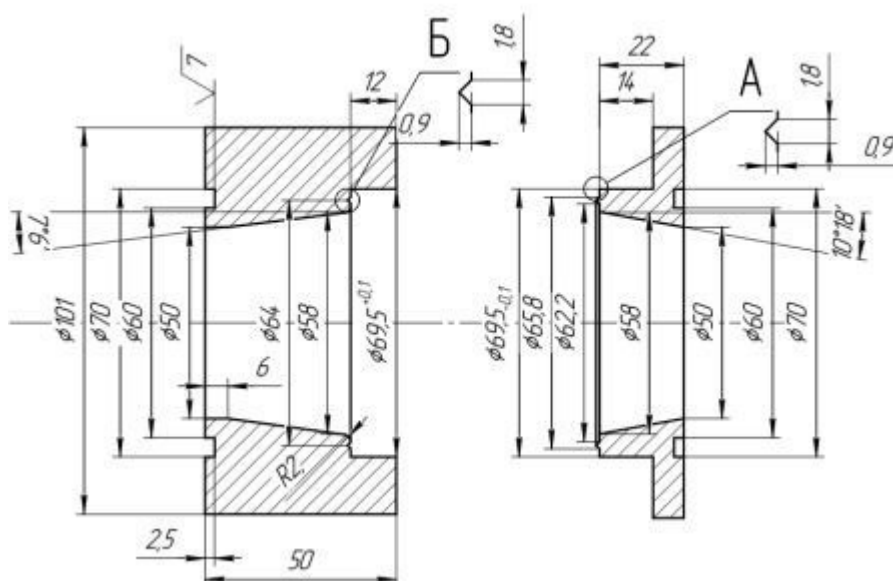


Рисунок 1.5 Чертеж конического диафрагменного узла.

Описание ударной трубы УТД и системы регистрации

Схема ударной трубы и системы сбора данных подробно описаны в работах [25, 26]. В систему регистрации добавлен дополнительный канал регистрации временной эволюции сигнала. Дополнительный измерительный канал на базе спектрографа Horiba 1061 с дисперсией 8 нм/мм регистрирует на ФЭУ R446 Hamamatsu эволюцию во времени излучения за фронтом ударной волны одновременно со спектрографом B&M50 на ФЭУ-100 в одном и том же измерительном сечении. Временное разрешение R446 не хуже 10 нс на нагрузке 50 Ом. На спектрографе B&M50 вместо регистрации временной эволюции может проводиться измерение интегральных по времени спектров излучения на ICCD камеру в отдельных спектральных диапазонах с высоким спектральным разрешением (до 0,04 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 входной щели s1 спектрографа B&M50 в кинетических экспериментах варьировалась из условий эксперимента от 100 до 200 мкм, а ширина входной и выходной щелей Horiba 1061 была фиксированной и составляла 0,5 мм. При этом ширина выходной щели s2 определяет регистрируемый спектральный интервал $\Delta\lambda$ в каждом эксперименте, где измерялась временная эволюция излучения за фронтом ударной волны, и указана на рисунках с временной эволюцией излучения.

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 Horiba CP140-1603 видимого диапазона (500-1100 нм).

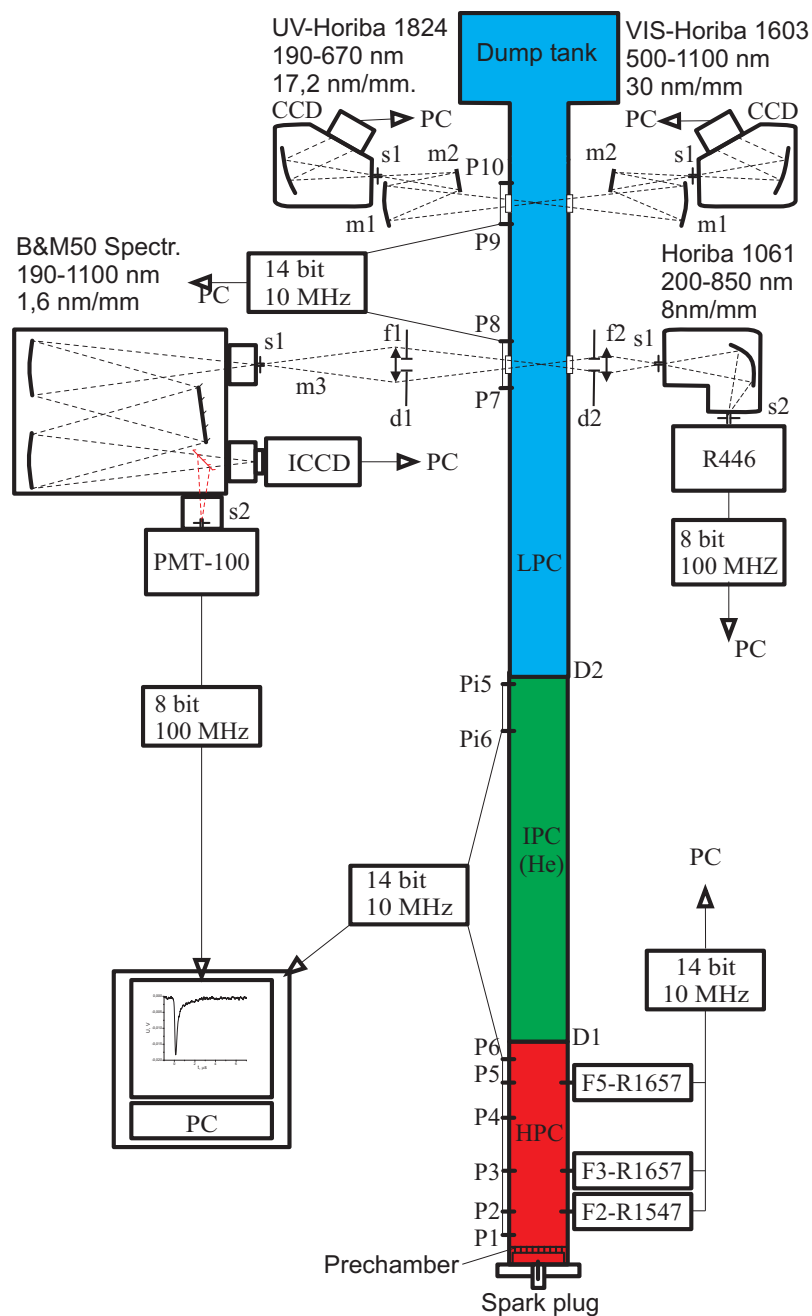


Рисунок 1.6. Схема экспериментальной установки.

Калибровка чувствительности каналов UV и VIS (CCD линейка) и ФЭУ R446 в абсолютных единицах спектральной яркости ($\text{Вт/см}^2/\text{мкм/стер}$) была выполнена с использованием вольфрамовой лампы СИ-10 (калибрована во

ВНИИОФИ) в диапазоне 300-1100 нм.

Значения спектральной яркости дейтериевой лампы ДДС-30 в диапазоне 190-360 нм брались в относительных единицах и сшивались с абсолютными значениями спектральной яркости лампы СИ-10. Для сравнения результатов, полученных на ударных трубах разного диаметра, получаемое значение спектральной яркости нужно разделить на диаметр ударной трубы. Таким образом, экспериментальные результаты представлены в виде спектральной плотности мощности B_λ в единицах (Вт/см³/мкм/стер). Единицы измерения спектральной плотности регистрируемой на ФЭУ такие же только с указанием ширины спектрального диапазона, в котором проводилась регистрация. Спектральная чувствительность ФЭУ R446 показана на рисунке 1.7.

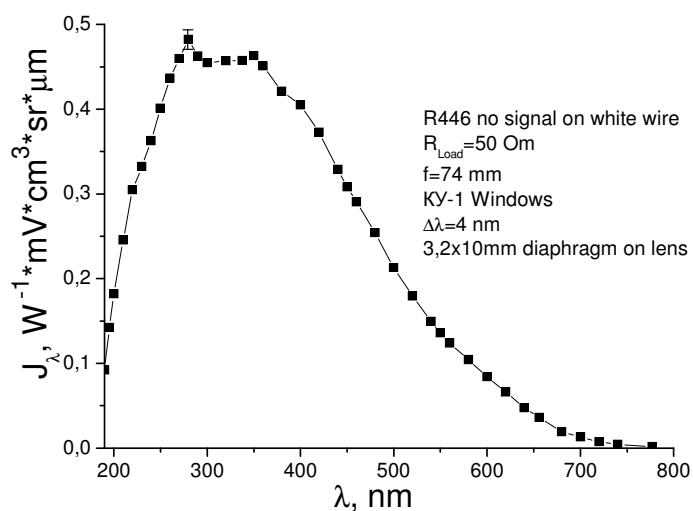


Рисунок 1.7. Кривая спектральной чувствительности ФЭУ R446 со спектрографом Horiba 1061 для геометрии на ударной трубе

Калибровка приемника на ФЭУ-100 используемого в канале с высоким спектральным разрешением не проводилась. Амплитуда сигнала в абсолютных единицах пересчитывалась из сравнения с сигналом, полученным на ФЭУ R446 на той же длине волны. Интенсивность максимума можно пересчитать из спектра, полученного на CCD приемнике в

предположении, что излучение, регистрируемое ФЭУ в известном спектральном интервале, является неравновесным с длительностью по половинной интенсивности $\delta\tau_{FDHW}$. При калибровке же каналов регистрирующих интегральное по длине пробки ударной волны излучение необходимо знать длину ударного слоя или время прохождения ударной волны мимо измерительного сечения (время экспозиции). Это время определяется из экспериментального временного распределения излучения. Длина пробки для определенного начального давления является величиной постоянной и не зависит от скорости ударной волны. Для начального давления $P_1=1$ Торр в воздухе она составляет 10 см. Более подробное описание процедуры калибровки приведено в [25].

Система регистрации на установке УТД позволяет одновременно получать интегральный по пробке ударной волны спектр излучения в абсолютных единицах спектральной плотности мощности в спектральном диапазоне 190-1100нм. В этом же эксперименте регистрируется эволюция во времени излучения в двух спектральных диапазонах с высоким временным и спектральным разрешением (кинетические измерения), либо вместо одного кинетического канала исследуется 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 10,5 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 делает ее способной быстро подстраивать для решения различных задач.

Результаты экспериментов

Задача образования оксида азота в воздухе при высоких температурах возникла в середине прошлого века и до сих пор актуальна [27, 5, 9]. В этой части отчета представлены экспериментальные результаты по исследованию неравновесного излучения молекулы NO в спектральном диапазоне 200-300 нм. Спектральный состав излучения воздуха при наличии молекулярных полос и атомарных линий при скоростях от 7 до 10 км/с подробно описан в работе [25]. При скоростях 4-5,5 км/с в спектре преобладает излучение полос $\gamma, \delta, \beta, \epsilon$ NO. При дальнейшем повышении скорости УВ интенсивность этих полос постепенно возрастает. Со скоростей УВ 5 км/с появляются молекулярные полосы $N_2(2^+)$, $N_2^+(1^-)$ и CN(фиолетовая система), которые сравниваются по интенсивности с интенсивностью полос NO при скорости 6-7 км/с.

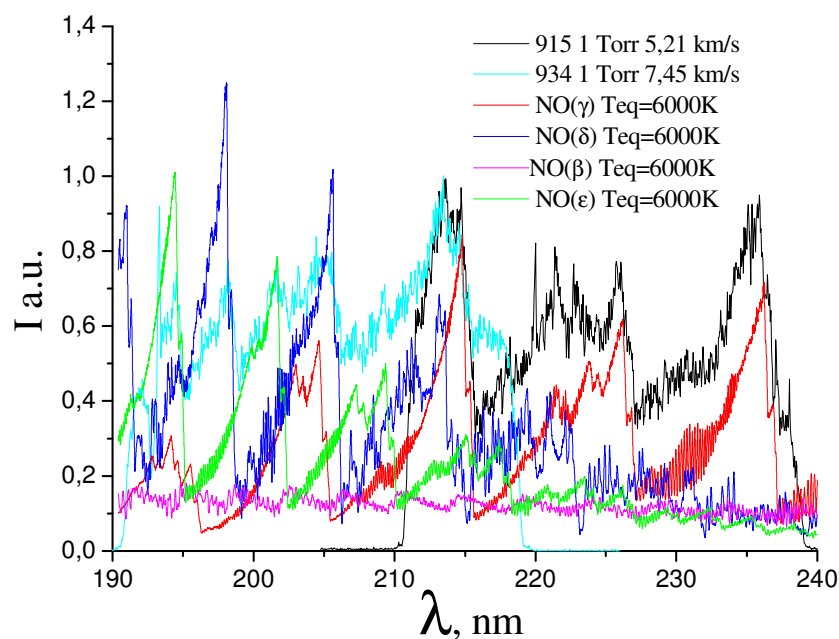
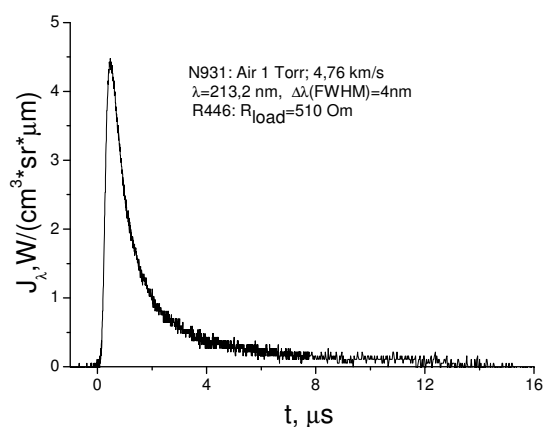


Рисунок 1.8. Экспериментальные спектры излучения оксида азота полученные с высоким спектральным разрешением на спектрографе B&M50 на ICCD камере и рассчитанные спектры для равновесной температуры 6000K

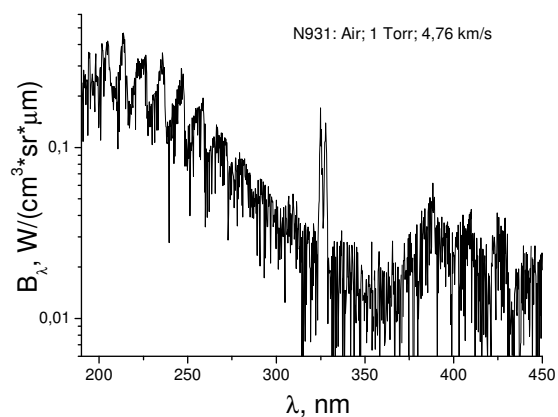
Для определения спектрального диапазона, где излучение молекулярных полос NO наиболее ярко выражено были зарегистрированы спектры излучения воздуха с высоким спектральным разрешением. Также были рассчитаны равновесные спектры излучения полос $\gamma, \delta, \beta, \epsilon$ NO для температуры 6000K по программе SpecAir [28]. Рисунок 1.8, позволяет определить, в каких участках спектра лучше всего проводить измерения интенсивности с помощью ФЭУ. Это 213 и 236 нм. В этих участках интенсивность полос NO достаточно велика, отсутствует излучение от полос других молекул и атомарных линий. Также чувствительность ФЭУ позволяет уверенно регистрировать спектры с низким уровнем шумов (р 1.7).

Всего было выполнено 70 экспериментов по исследованию свойств неравновесного излучения NO в ударно нагретом воздухе. На длине волны 213 нм была проведена основная серия экспериментов в диапазоне скоростей 4.2-10,5 км/с и начальных давлений от 5 до 0,2 Торр и при одновременной регистрации временной эволюции на длинах волн 236 и 213 нм. При скоростях выше 8 км/с начальное давление воздуха выбиралось в диапазоне от 0,2 до 1 Торр из условия, чтобы длительность неравновесного излучения была более 100 нс на ФЭУ R446, а на ФЭУ-100 более 50 нс.

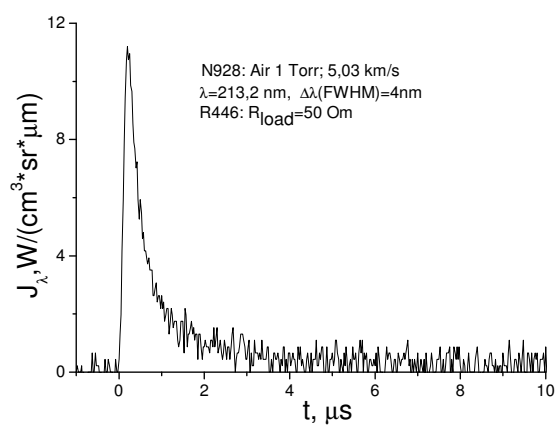
Рисунки 1.9, 1.10 и 1.11 показывают временную эволюцию спектральной яркости и интегральную плотность энергетической яркости для различных скоростей ударной волны и начальных давлений. Рисунки показывают, основной вклад в излучение NO вносит неравновесное излучение. Длительность неравновесного излучения сокращается от 2 мкс до 0,05 мкс с увеличением скорости при начальном давлении воздуха 1 Торр. Интенсивность молекулярных полос NO также заметно возрастает. При скоростях ударной волны выше 6 км/с длительность излучения становится менее 0,2 мкс, а интенсивность излучения NO замедляет рост. Также увеличивается интенсивность равновесного излучения.



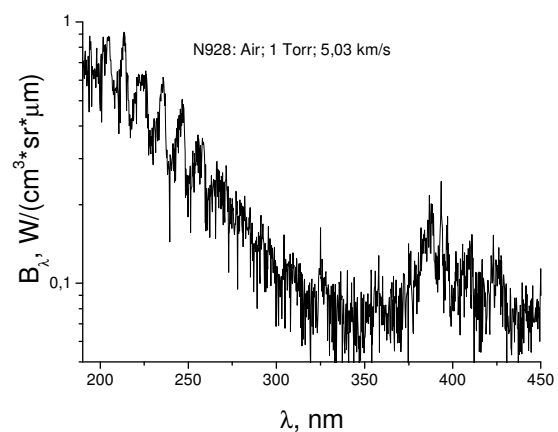
a)



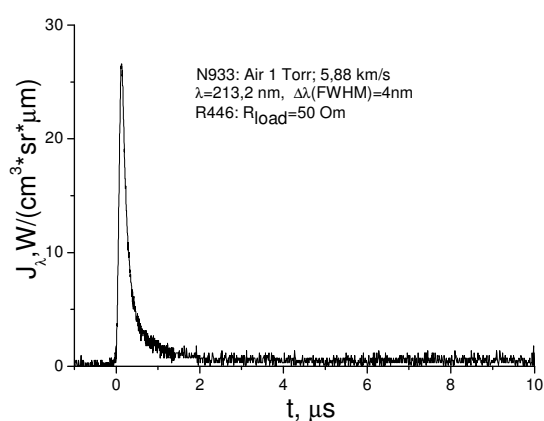
b)



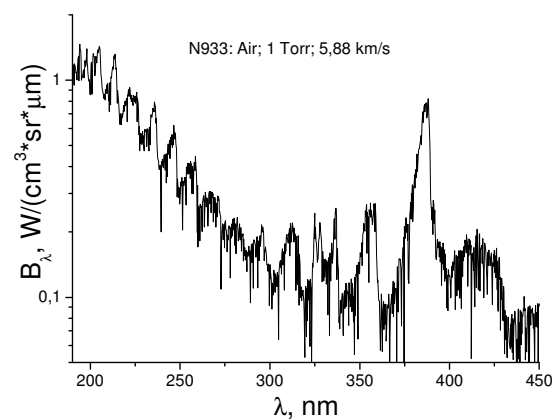
c)



d)

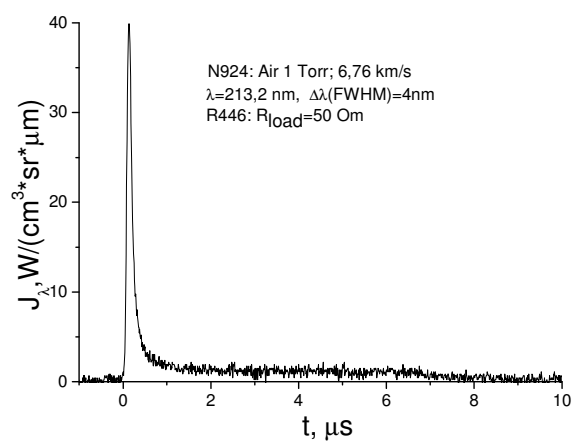


e)

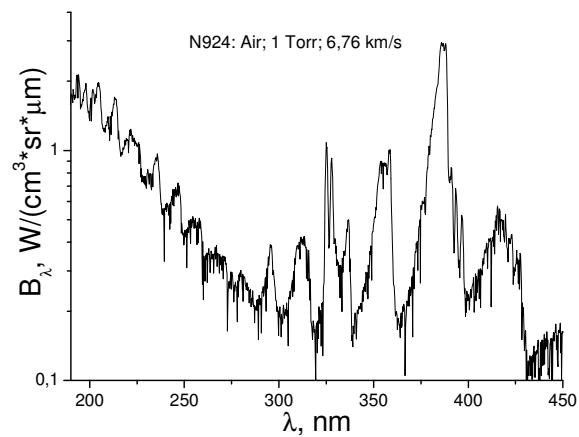


f)

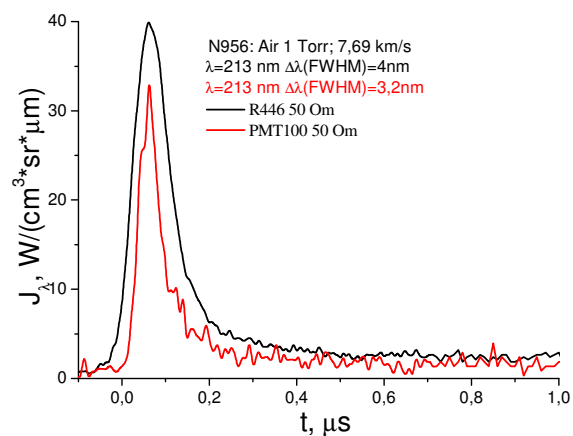
Рисунок 1.9. Временная зависимость спектральной яркости на длине волны а), с), е) и интегральная спектральная плотность энергетической яркости б), д), ф) для воздуха при начальном давлении $P_1=1$ Торр, и скоростях УВ $V_{\text{sw}}=4,76; 5,03; 5,88$ км/с



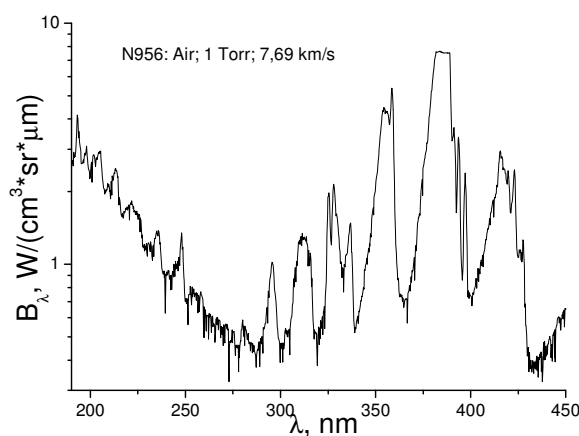
a)



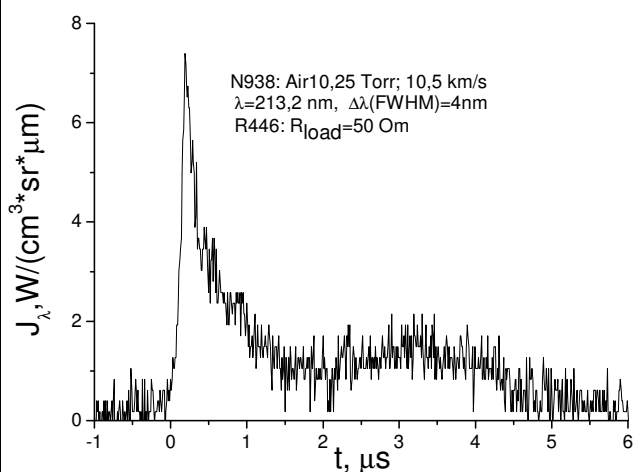
b)



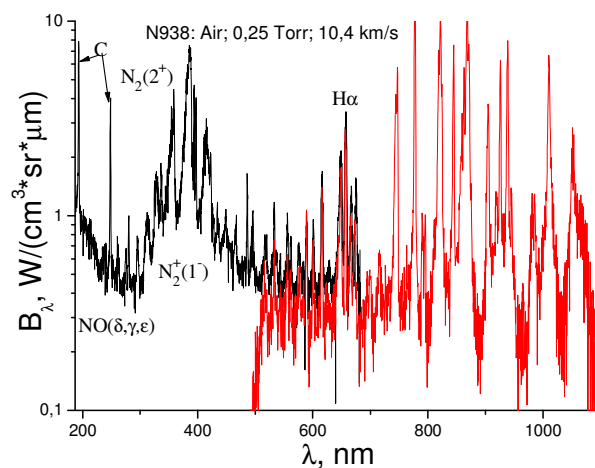
c)



d)

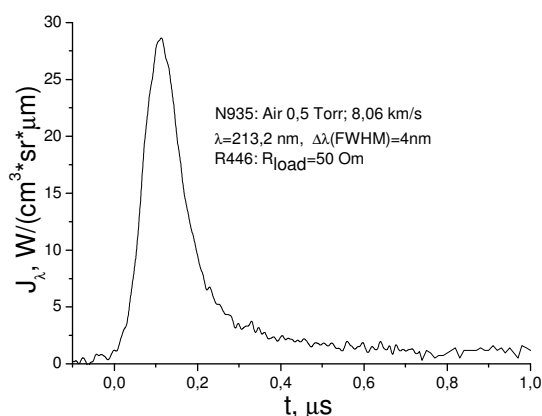


e)

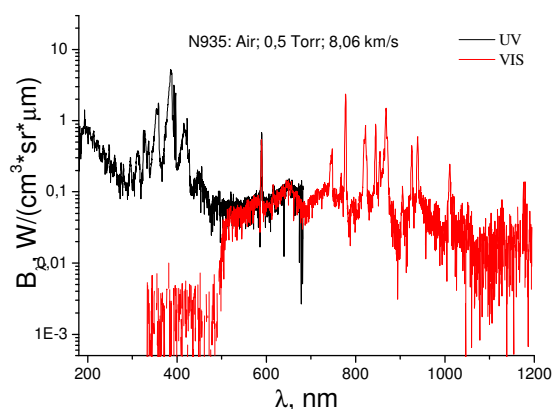


f)

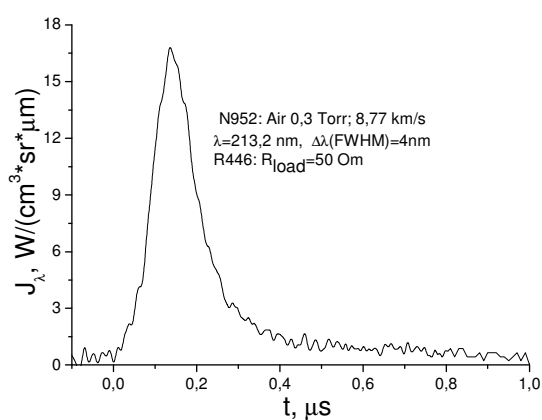
Рисунок 1.10. Временная зависимость спектральной яркости на длине волны а), с), е) и интегральная спектральная плотность энергетической яркости б), д), ф) для воздуха при начальном давлении $P_1=1$ Торр, и скоростях УВ $V_{\text{sw}}=6,76; 7,69; 10,5 \text{ км/с}$



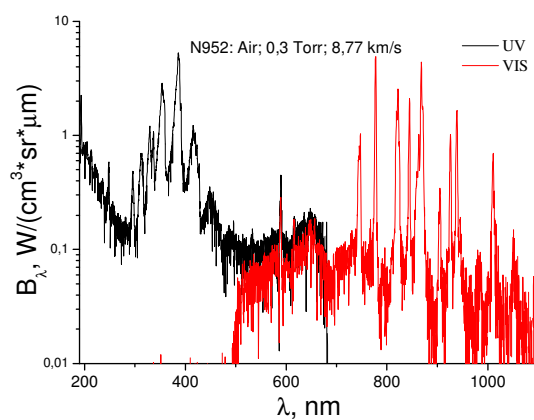
a)



b)



c)



d)

Рисунок 1.11. Временная зависимость спектральной яркости на длине волны 213,2 нм а), с) и интегральная спектральная плотность энергетической яркости b), d) для воздуха при начальном давлении $P_1=0,5$ и 0,3 Торр, и скоростях УВ $V_{sw}=8,06$ и 8,77 км/с

На рисунках 1.12 и 1.13 показаны примеры временной зависимости спектральной яркости излучения NO для различных скоростей и начальных давлений ударно нагретого воздуха на длинах волн 213 и 236 нм. Характер неравновесного излучения на этих длинах волн одинаковый. Различие длительностей излучения, в каналах наблюдаемое на рисунках обусловлено более высоким пространственным разрешением канала с ФЭУ-100. Однако когда пространственное разрешение в канале с ФЭУ R446 меньше длительности неравновесного излучения его длительность в обоих каналах становится одинаковой.

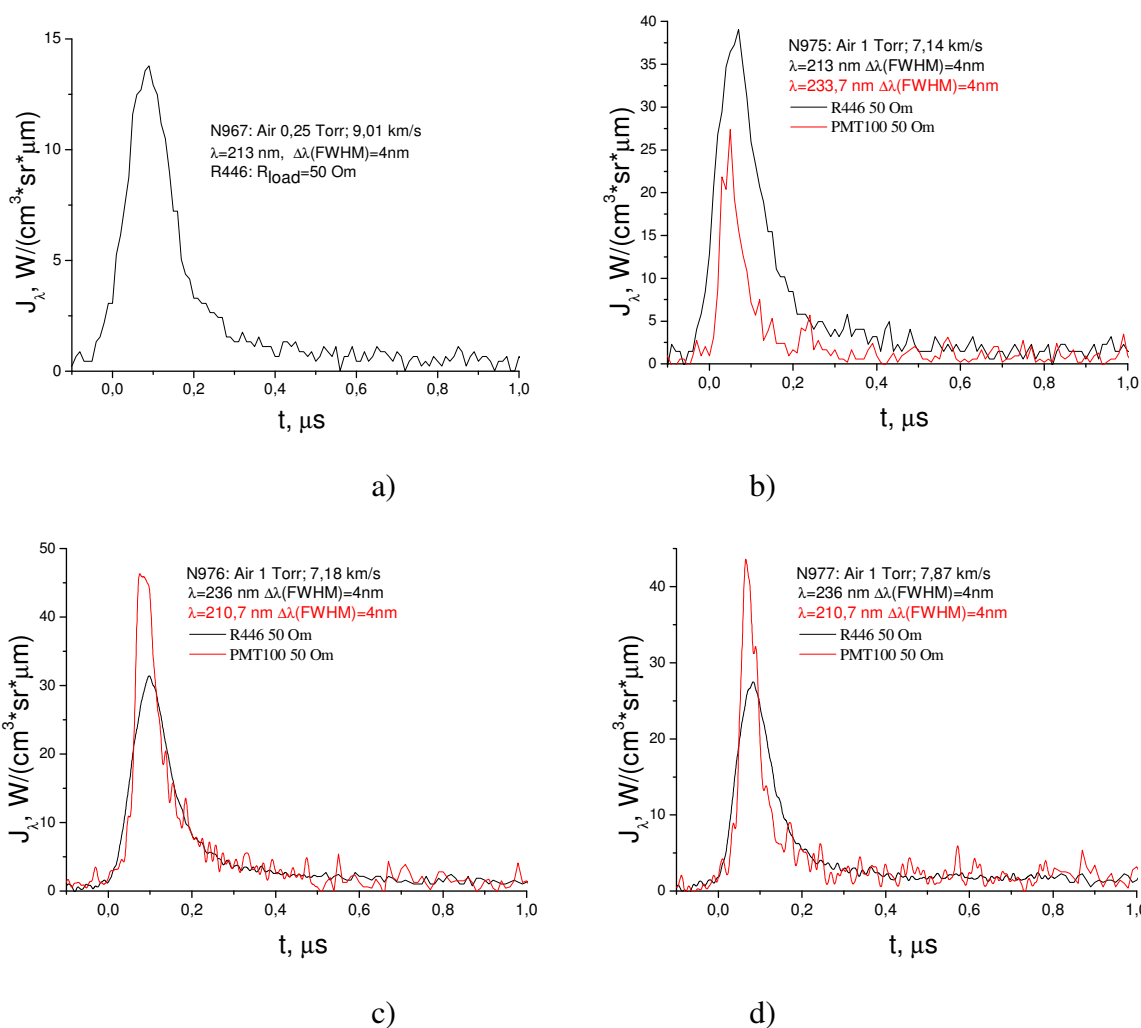


Рисунок 1.12. Временная зависимость спектральной яркости на длине волны 213нм а) и на длинах волн 213; 215,7; 236 нм начальных давлениях $P_1=0,25$ и 1 Торр, и скоростях УВ $V_{\text{sw}}=9,01; 7,14; 7,18$ и $7,87$ км/с

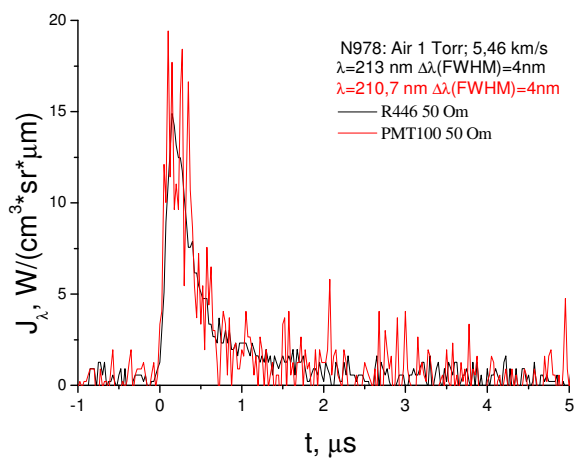


Рисунок 1.13. Временная зависимость спектральной яркости на длинах волн 213 и 236 нм и начальном давлении $P_1=1$ Торр, и скорости УВ $V_{\text{sw}}=5,46$ км/с

Из представленных выше рисунков можно определить длительность по половине ширины и максимальную амплитуду излучения в исследуемом спектральном интервале ($213 \pm 2 \text{ нм}$). Амплитуда в пике излучения зависит от скорости и начального давления. При одной и той же скорости ударной волны можно полагать, что интенсивность линейно зависит от давления за волной (или начального давления). Длительность неравновесного излучения также зависит как от скорости ударной волны, так и от давления за ударной волной. Обычно эту длительность приводят к постоянному давлению за волной. В данной работе длительность и амплитуда приведена к начальному давлению исследуемого газа при $P_1 = 1 \text{ Торр}$. Амплитуду неравновесного излучения в пике как указывалось выше можно рассчитать и из интегральных спектров. На рисунке 1.14. представлена зависимость интенсивности пика неравновесного излучения на длине волны $213 \pm 2 \text{ нм}$ приведенная к начальному давлению $P_1 = 1 \text{ Торр}$ от скорости ударной волны.

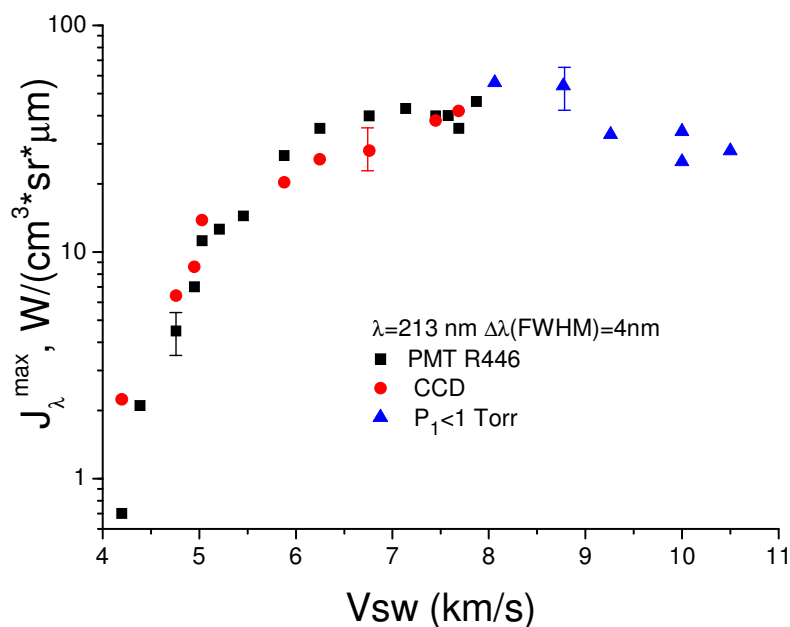


Рисунок 1.14. Зависимость интенсивности пика неравновесного излучения на длине волны $213 \pm 2 \text{ нм}$ приведенная к начальному давлению $P_1 = 1 \text{ Торр}$ от скорости ударной волны ■ - данные полученные на ФЭУ; ● - данные из пересчета интегрального сигнала с CCD камеры; ▲ - данные полученные на ФЭУ для давлений $P_1 < 1 \text{ Торр}$.

В работе [9] методом прямого статистического моделирования (DSMC) обработаны экспериментальные результаты из работы [5] группы Горелова. В экспериментах исследовалось неравновесное излучение NO нагретого ударной волной в воздухе при начальном давлении $P_1=0,1$ Торр для скоростей 5-11 км/с. Рисунок 1.15 взят из работы [9] и показывает сравнение эксперимента [5] с результатами моделирования. Расхождение эксперимента и расчета авторы [9] предполагают объяснить в следующей публикации. Однако зависимость, показанная на рисунке 1.14, хорошо согласуется с результатами расчета рисунок 1.15.

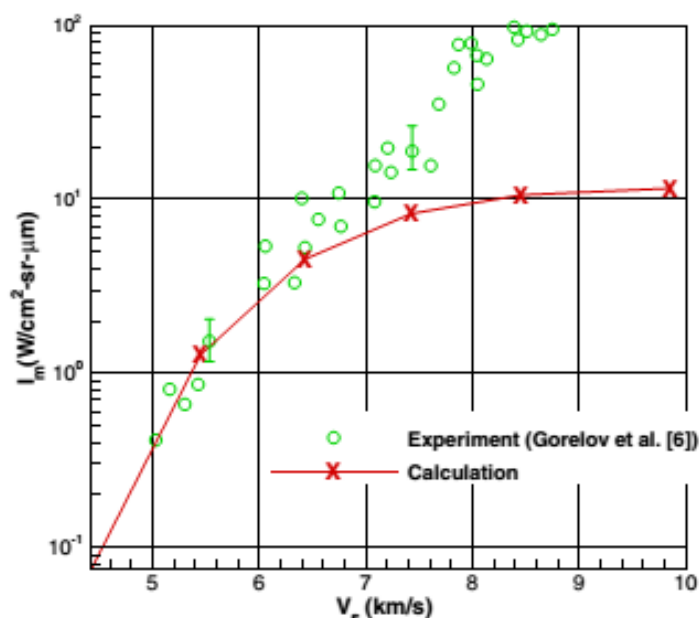


Fig. 16 Calculated radiation peak, I_m , vs all the V_{eff} cases considered and the experimental data.

Рисунок 1.15. Зависимость интенсивности пика неравновесного излучения на длине волны 237 ± 7 нм от скорости ударной волны взятая из работы [9] рисунок 16.

Рисунок 1.16 показывает сводные экспериментальные данные по измерению длительности неравновесного излучения NO на длине волны 213 ± 2 нм в зависимости от скорости ударной волны. Данные получены при разных начальных давлениях в разных измерительных каналах и приведенные к начальному давлению $P_1=1$ Торр. Также показаны рассчитанные в работе [9] длительности неравновесного излучения NO на

длине волны 236 ± 7 нм для начального давления $P_1 = 0,1$ Торр приведенное $P_1 = 1$ Торр. Сравнение длительности неравновесного излучения, полученное в эксперименте, в 2-3 раза превышает пересчитанные данные расчета из работы [9]. Различие может быть обусловлено тем, что расчет проводился для более низкого начального давления и пересчет длительности для давления $P_1 = 1$ Торр не совсем корректен. Так измеренное время для давления $P_1 = 1$ Торр при скоростях ударной волны 4-5 км/с в 1,5-2 раза ниже пересчитанного времени измеренного для давлений $P_1 > 1$ Торр. Это означает, что кинетика образования электронно-возбужденных состояний NO зависит от давления за фронтом ударной волны.

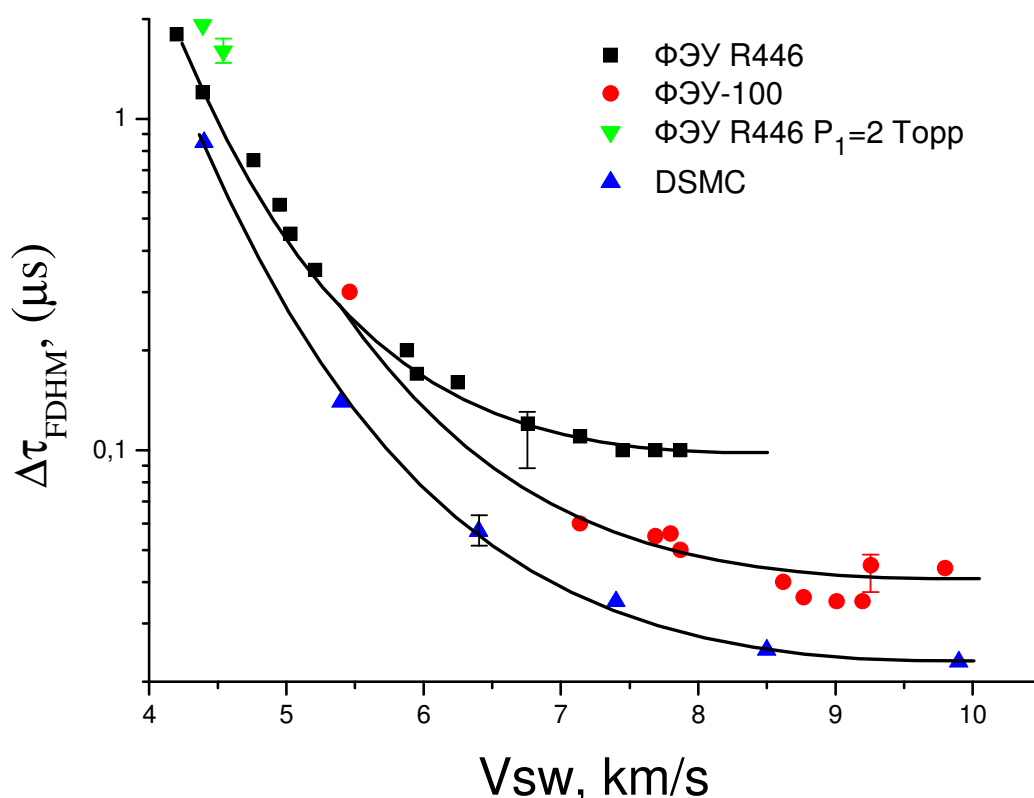


Рисунок 1.16. Зависимости длительности по половинной интенсивности неравновесного излучения на длине волны 213 ± 2 нм приведенные к начальному давлению $P_1 = 1$ Торр от скорости ударной волны: ■ - данные полученные на ФЭУ R446 ($P_1 = 1$ Торр); ● - данные с ФЭУ-100 (для $V_{sw} > 8$ км/с $P_1 < 1$ Торр); ▲ - пересчитанные данные к $P_1 = 1$ Торр из работы [9]; ▼ экспериментальные данные, пересчитанные к $P_1 = 1$ Торр полученные для давлений $P_1 > 1$ Торр.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ АБСОЛЮТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ УВ НА УСТАНОВКЕ УТС В СМЕСИ $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Описание установки УТС

Ударная труба состоит из двух камер круглого сечения, разделенных диафрагмой [29]. Камера низкого давления (далее – КНД) длиной 4 м состоит из семи секций, сочлененных фланцами. Длина камеры высокого давления (далее – КВД) – 0,7 м. Внутренний диаметр ударной трубы по всей ее длине одинаков и составляет 5 см, толщина стенок трубы - 2,5 см. Между КВД и КНД устанавливается кассета с медной диафрагмой толщиной 0,13 – 0,31 мм. За диафрагмой со стороны КНД установлен крестообразный нож, ускоряющий и стабилизирующий процесс раскрытия диафрагмы.

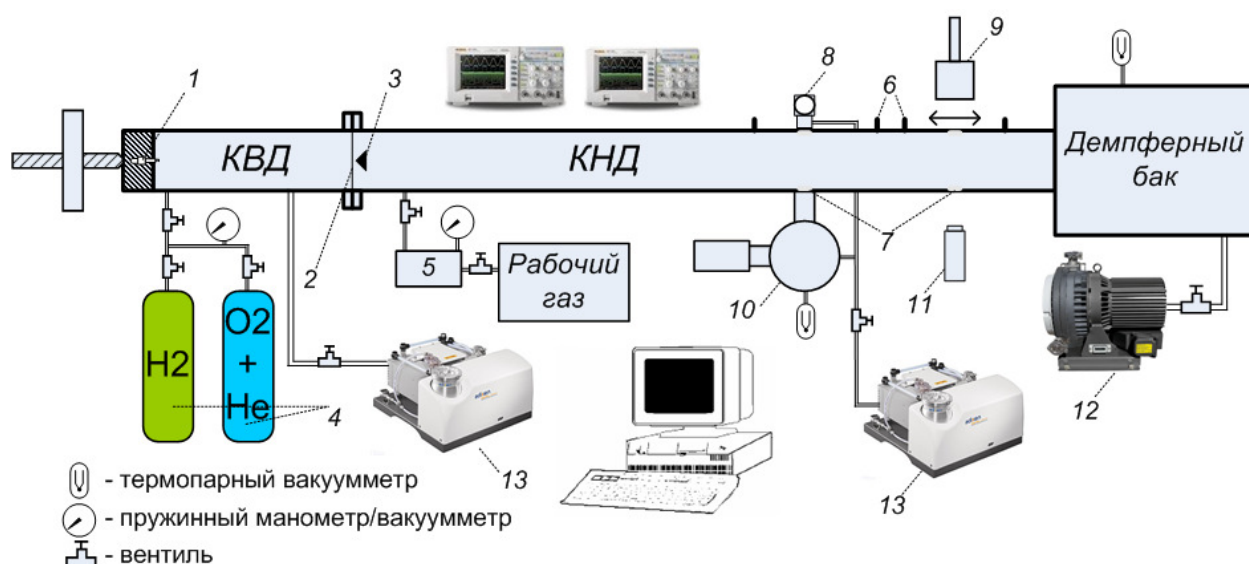


Рисунок 2.1. Экспериментальная установка. 1 – свеча; 2 – диафрагма; 3 – ножи; 4 – баллоны с газом высокого давления; 5 – промежуточная мерная емкость для рабочего газа; 6 – пьезодатчики; 7 – оптические окна; 8 – дейтериевая лампа; 9 – оптическая система видимого диапазона; 10 – оптическая система ВУФ диапазона; 11 – лазер, дейтериевая или ртутная лампа; 12 – диффузионный насос; 13 – турбомолекулярный насос.

Толкающим газом во всех экспериментах являлась гремучая смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, разбавленная гелием в соотношении $10\%\text{O}_2 + 20\%\text{H}_2 + 70\%\text{He}$. Для обеспечения лучшего перемешивания компонентов смеси O_2 и He хранятся в одном баллоне. Давление напуска изменялось в пределах 4...8 атм. Поджиг

гремучей смеси осуществляется искровым разрядом автомобильной свечи, расположенной в торце КВД; при детонации давление в КВД в несколько раз увеличивается, таким образом, реальное p_4 составляло примерно 20...50 атм.

Камера низкого давления и демпферный бак откачивались безмасляным постом Drytel 1025, состоящим из мембранного форвакуумного и турбомолекулярного высоковакуумного насосов, до остаточного давления $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. Камера высокого давления откачивалась сухим спиральным насосом ISP-250С. Контроль степени откачки осуществлялся с помощью термопарных ламп ПМТ-2 и вакуумметров ВИТ-2. Натекание воздуха вследствие негерметичности и десорбции газа со стенок трубы составляло не более $4 \cdot 10^{-4}$ Торр/мин.

На конце КНД установлен демпферный бак объемом 100 литров, который поглощает ударную волну. Таким образом, в данной установке отраженная ударная волна не возникает.

Одна из секций КНД – измерительная, в ней имеются два оптических окна диаметром 8 мм, расположенных напротив друг друга для наблюдения за излучением исследуемого газа. Материал окон – фтористый магний. Напротив одного из окон установлена оптическая регистрирующая система, второе окно использовалось для ее калибровки. В этой же секции установлены пьезоэлектрические датчики, позволяющие измерить скорость падающей ударной волны.

Скорость падающей волны в ударной трубе измеряется при помощи шести пьезоэлектрических датчиков конструкции Г.Н. Сунцова, вмонтированных в стенки измерительной секции трубы (по три в каждой секции) на расстоянии $50,0 \pm 0,1$ мм друг от друга.

Методики измерений

Оптическая схема системы приведена на рис. 2.2. В зависимости от поставленных задач система позволяет регистрировать либо спектральное

распределение интенсивности, либо временное. Диапазон спектра – 110...650 нм.

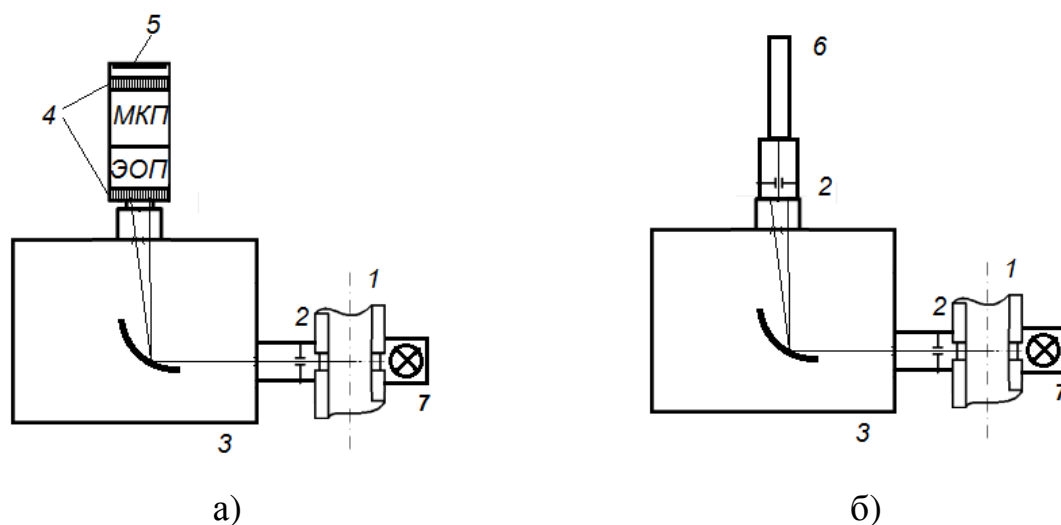


Рисунок 2.2. Оптическая схема системы регистрации на ударной трубе УТС спектрального распределения излучения (а) и временного распределения излучения (б) в области вакуумного ультрафиолета. 1 – участок ударной трубы с оптическими окнами; 2 – входная щель спектрального прибора; 3 – спектральный прибор ВМ-1; 4 – волоконные шайбы; 5 – ПЗС; 6 – ФЭУ; 7 – калибровочная дейтериевая лампа.

В качестве спектрального прибора используется вакуумный монохроматор ВМ-1 с фокусным расстоянием $f = 500$ мм, работающий по схеме Сейя-Намиока, в которой вогнутая дифракционная решетка сочетает в себе функции диспергирующего и коллимирующего элементов. Обратная дисперсия прибора ВМ-1 составляет ~ 1.7 нм/мм при работе с решеткой 1200 штр./мм и ~ 3.5 нм/мм – с решеткой 600 штр./мм. Решетки работают в первом порядке дифракции, при угле падения равном углу отражения и составляющем примерно 35° .

В экспериментах по регистрации спектрального распределения излучения в качестве приемника излучения использовалась высокочувствительная скоростная камера для регистрации спектров быстропротекающих процессов ЛЕГА-ВУФ [30]. Её характеристики представлены ниже:

- Количество кадров – 1;
- ЭОП поколения 2+ планарной конструкции

- Материал входного окна ЭОП – MgF_2 ;
- Время послесвечения люминофора экрана – 5 мс;
- Оптика переноса изображения с экрана ЭОП на ПЗС матрицу в масштабе 1:1;
- ПЗС матрица:
 - количество активных пикселей – 1392×1032 ;
 - размер поля ПЗС матрицы – $8.98 \text{ мм} \times 6.65 \text{ мм}$;
 - динамический диапазон АЦП – 12 бит;
- Диапазон спектра – 115...650 нм.

За один эксперимент снимается изображение спектра шириной 55 нм.

В экспериментах по регистрации временных зависимостей излучения сразу за выходной щелью монохроматора размещался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R6835. ФЭУ R6835 относится к солнечно-слепому типу ФЭУ, спектральный диапазон его чувствительности приходится на интервал длин волн 115 – 200 нм. Диаметр светового окна ФЭУ – 23 мм, окошко из MgF_2 . Быстродействие ФЭУ – 22 нс. Спектральный интервал излучения, регистрируемого ФЭУ, определяется шириной выходной щели монохроматора. Кроме того, в окошке ударной трубы размещалась вставка с щелевой диафрагмой размерами $0.3 \times 8 \text{ мм}^2$.

Все экспериментальные данные были откалиброваны в абсолютных единицах ($\text{Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$) методом сравнения с известным источником, в качестве которого выступали дейтериевая лампа "Hamamatsu" для системы ВУФ-диапазона и лампа накаливания СИ-10 для системы видимого диапазона спектра. Сравнение экспериментальных спектров излучения дейтериевой лампы с паспортными данными интенсивности ее излучения представлено на рис. 2.3.

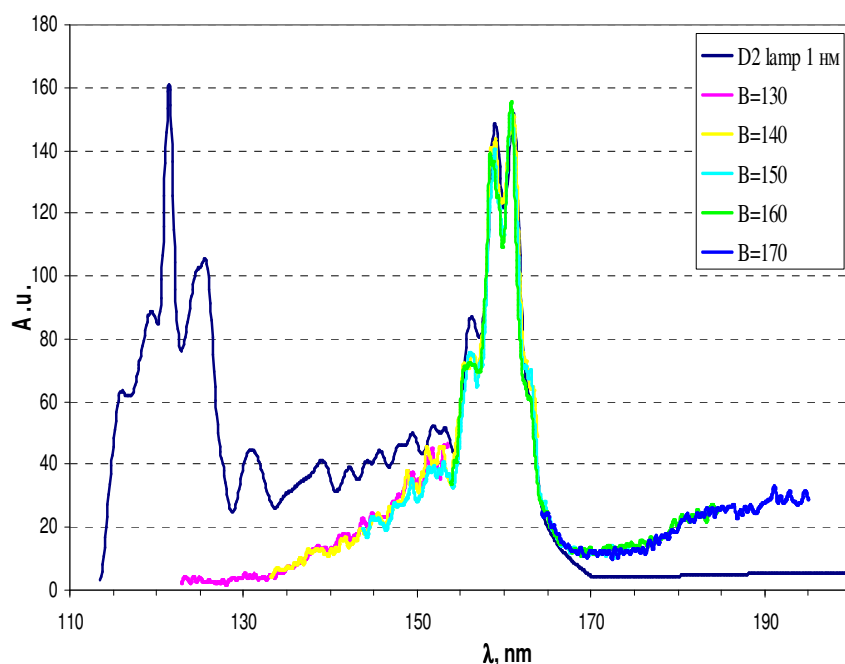


Рисунок 2.3. Калибровка вакуумного монохроматора с использованием дейтериевой лампы

Используя геометрические данные оптической схемы, представленные на рис. 2.4., по формуле (1) рассчитывалась интенсивность излучения УВ $J_0(\lambda)$ [30].

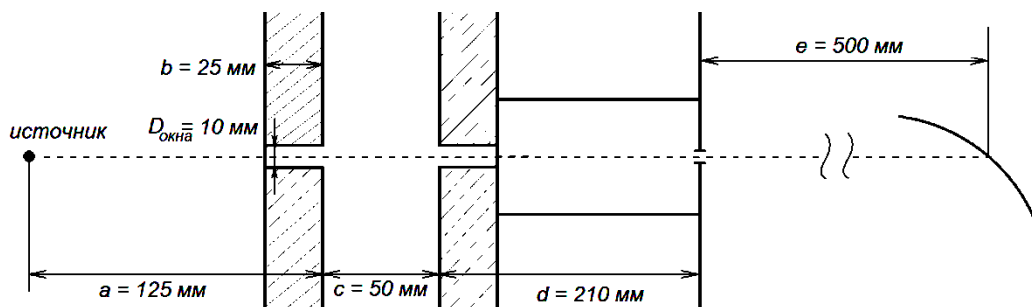


Рисунок 2.4. Геометрические параметры оптической схемы эксперимента

$$J_0(\lambda) = \frac{S_{\text{сигн}} \cdot J_{D_2 \text{ lamp}}(\lambda) \cdot \frac{\sigma_{\text{ист}}}{(a+c+d)^2} \cdot \tau_{\text{кал}}}{S_{\text{кал}} \cdot c \cdot \frac{\sigma_{\text{окна}}}{(d+b)^2} \cdot \tau_{\text{сигн}}} \quad (1)$$

В формуле (1) $\sigma_{\text{ист}}$ - площадь излучающей поверхности лампы, $\sigma_{\text{окна}}$ - площадь окна трубы, $\tau_{\text{кал}}$ - время экспозиции лампы, $\tau_{\text{сигн}}$ - время свечения фронта УВ, $S_{\text{кал}}$ - экспериментальная интенсивность спектра дейтериевой

лампы в отсчетах, $S_{\text{сигн}}$ - экспериментальная интенсивность спектра излучения УВ, $J_{D2\text{lamp}}$ - интенсивность излучения дейтериевой лампы в абсолютных энергетических единицах.

Результаты экспериментов

На рис. 2.5 приведён пример экспериментального спектра излучения УВ для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ в пропорции 70:30 при начальном давлении 0,32 Торр и скорости УВ 7 км/с

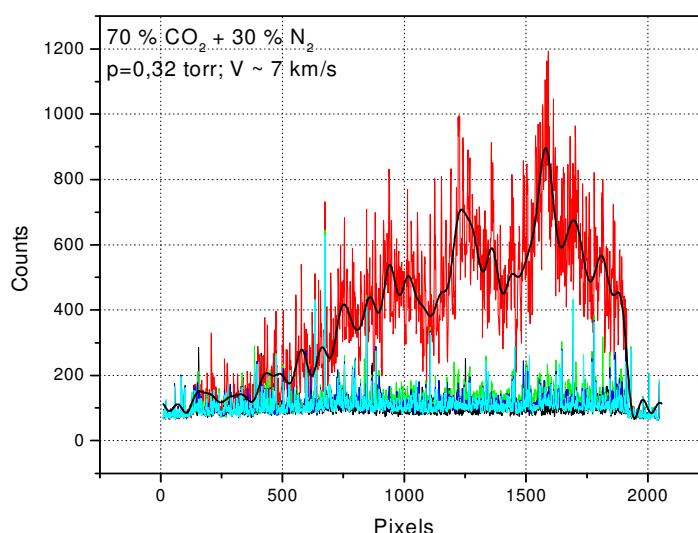


Рисунок 2.5. Пример экспериментального спектра излучения УВ в смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (70:30) при начальном давлении 0,32 Торр и скорости УВ 7 км/с

На рис. 2.6 приведенный выше спектр, пересчитанный в абсолютные энергетические единицы сопоставлен с расчетным спектром излучения молекулы СО на переходе А-Х при значениях электронной, колебательной и вращательной температур равных 7000 К и концентрации частиц $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^3$, рассчитанный для аппаратной функции гауссова профиля полушириной 1 нм [31, 32]. Из сравнения спектров видно, что наблюдаемые особенности структуры спектра в области 160 - 180 нм неплохо совпадают с расчетным спектральным распределением

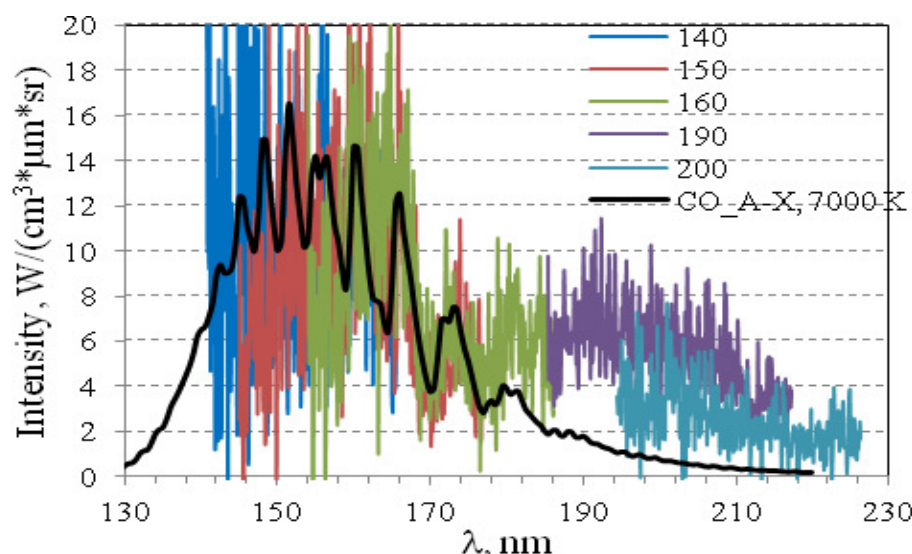


Рисунок 2.6. Сопоставление расчетного спектра излучения молекулы СО на переходе А-Х с экспериментальными данными

Основные результаты в работе по изучению излучения УВ в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ получены для двух значений пропорции смешиваемых компонент – 70:30 и 96:4, соответственно.

В таблице 2.1 приведены начальные данные для экспериментов в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ (70:30).

Таблица 2.1

Газовая смесь (пропорция)	$\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (70:30)
Диафрагма: материал (толщина)	Cu ($\delta = 0,13$ мм)
Начальное давление в КВД	4 атм

В таблице 2.2 приведены начальные данные для экспериментов в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ (96:4).

Таблица 2.2

Газовая смесь (пропорция)	$\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (96:4)
Диафрагма: материал (толщина)	Cu ($\delta = 0,13$ мм)
Начальное давление в КВД	4 атм
Начальное давление в КНД p_1	0,25 Торр
Начальная температура в КНД T_1	295 К
Скорость ударной волны v	7,5 км/с

Зарегистрированные спектры излучения для этих условий

эксперимента в относительных (а) и абсолютных (б) единицах измерения представлены на рис. 2.7.

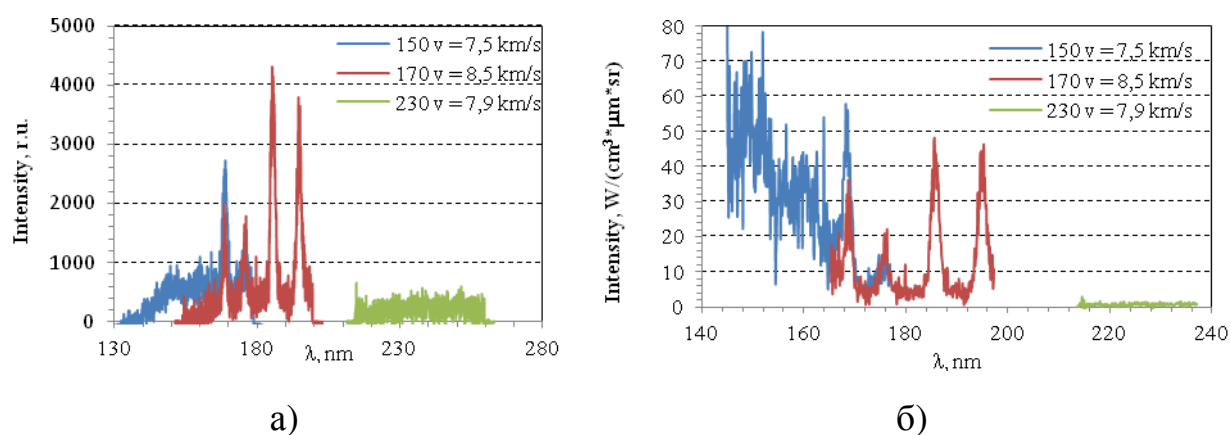


Рисунок 2.7. Спектры газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (96:4) в относительных (а) и абсолютных (б) единицах измерения

Временные зависимости измерялись как для интегрального по спектру излучения (в нулевом порядке дифракции монохроматора $\lambda = 0$ нм), так и в узком спектральном интервале (~ 3 нм) на некоторых длинах волн.

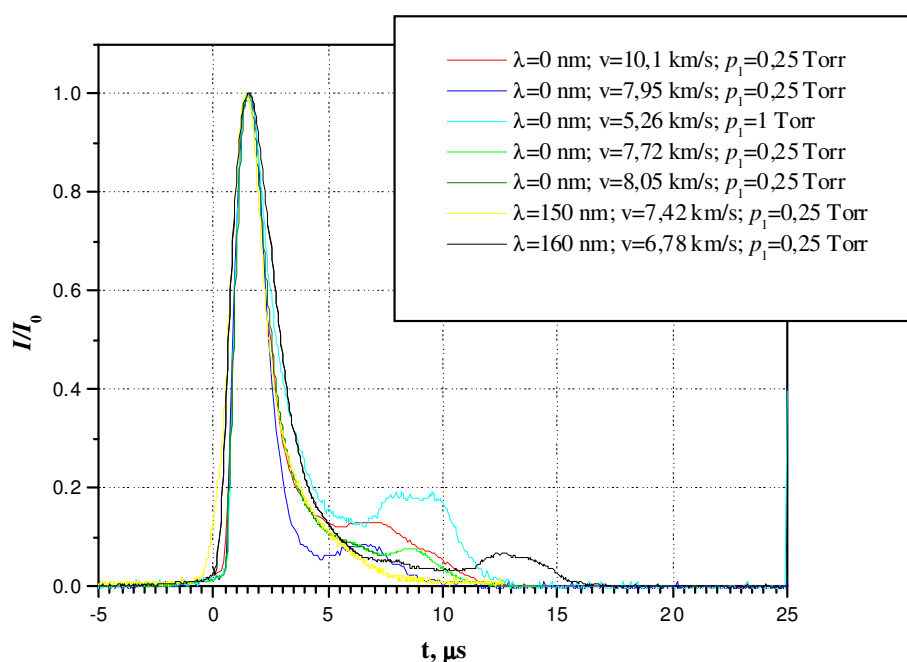


Рисунок 2.8. Временные распределения излучения УВ в смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (96:4)

На рисунке 2.8 приведены временные зависимости интегрального излучения УВ, нормированного на максимальное значение интенсивности для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (96:4). Там же представлено временное распределение

излучения на длинах волн 150 и 160 нм, при этом кардинальных различий в характере временных зависимостей не наблюдается.

На рис. 2.9 приведены временные зависимости интегрального излучения УВ, нормированные на максимальное значение интенсивности для смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (70:30) при разных начальных давлениях и разных скоростях УВ.

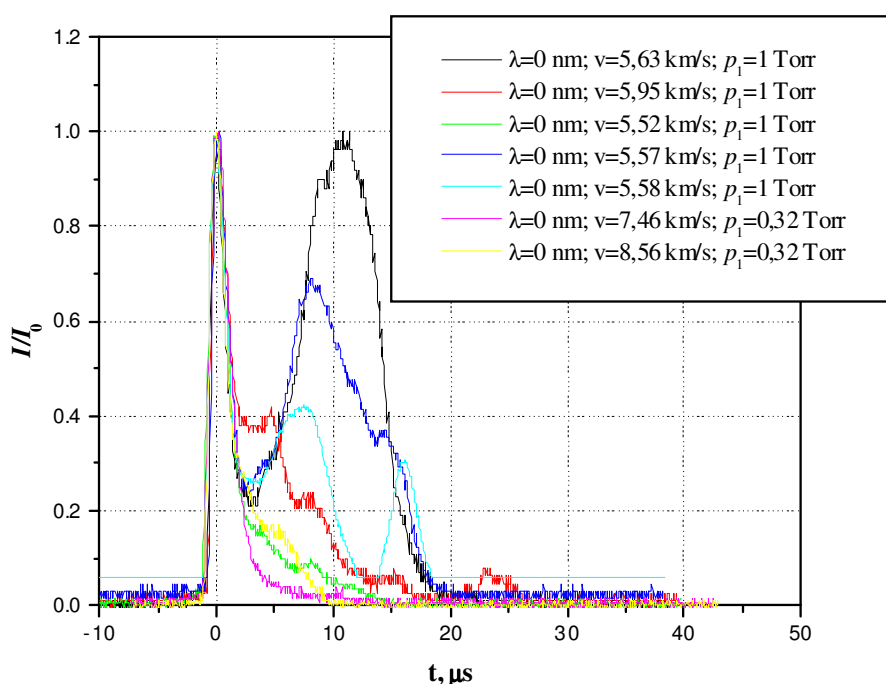


Рисунок 2.9. Временное распределение интегрального излучения УВ в смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (70:30)

Полученные зависимости имеют общий характер – ярко выраженный максимум во фронте УВ и менее интенсивное излучение в пробке УВ. Длительность максимума излучения по полуширине для $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ смеси составляет примерно $3 \pm 0,2$ и 5 ± 1 мкс для соотношения газов 70:30 и 96:4 соответственно. Кроме того, интенсивность излучения в пробке с уменьшением скорости УВ растет относительно излучения во фронте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования неравновесного излучения полос $\gamma, \delta, \beta, \epsilon$ оксида азота в спектральном диапазоне 190-300 нм. Получены зависимости пиковой интенсивности и длительности неравновесного излучения от скорости ударной волны на длине волны 213 ± 2 нм. Проведено сравнение полученных данных с результатами DSMC расчетами из работы [9]. По результатам работы подана статья на AIAA конференцию, в которой проведено сравнение интенсивностей и длительностей с расчетами по радиационно-столкновительной модели.

В абсолютных энергетических единицах измерены спектры излучения ударной волны в области вакуумного ультрафиолета в газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ в пропорциях 96:4 и 70:30, соответственно. Абсолютная интенсивность излучения УВ для пропорции 96:4 в 4-5 раза превышает интенсивность излучения для пропорции 70:30. Таким образом, добавление к углекислому газу молекулярного азота, обладающего высоким значением энергии диссоциации, приводит к "тушению" излучения.

Измерена временная эволюция интенсивности интегрального излучения УВ и излучения на отдельных линиях. В большинстве зарегистрированных осциллограмм проявляются два максимума излучения, причем относительная интенсивность этих максимумов существенным образом зависит от пропорции газовой смеси. А именно, при увеличении концентрации азота в смеси относительная величина второго максимума возрастает. Это может указывать на то, что второй максимум излучения связан с химическими превращениями, происходящими в пробке ударной волны с участием азота.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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., and Surzhikov S.T., “Nonequilibrium spectral radiation behind the shock waves in Martian and Earth atmospheres,” AIAA 2013-2505. 2015. 10 p.
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,” AIAA 2012-0795. 2012. 10 p.
5. Gorelov V. G., Ladyshev M., Kireev A. Yegorov I., Plastinin Y., and Karabadzhak G.. Experimental and Numerical Study of Nonequilibrium Ultraviolet NO and N_2^+ Emission in Shock Layer. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 12, No. 2, 1998, pp. 172–179.
6. Zalogin G.N., Kozlov P.V., Kuznetsova L.A., Losev S.A., Makarov V.N., Romanenko Yu.V. and Surzhikov S.T., “Radiation Excited by Shock Waves in a CO_2 - N_2 -Ar Mixture: Experiment and Theory,” *Technical Physics*. 2001. Vol. 46. No. 6. pp. 654-661.
7. Surzhikov S.T., “Radiative-Collisional Models in Non-Equilibrium Aerothermodynamics of Entry Probes,” *J. Heat Transf.*, Vol. 134. No. 3. 2012. pp. 031002-1 – 031002-11.
8. Brandis A.M. Johnston C.O. Cruden B.A., Prabhu D.K. and Bose D., “Validation of High Speed Earth Atmospheric Entry Radiative Heating from 9.5 to 15.5 km/s,” AIAA 2012-2865. 2012.
9. Zhu T., Li Z. And Levin D. A. “Modeling of Unsteady Shock Tube Flows Using Direct Simulation Monte Carlo” Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 28, No. 4 (2014), pp. 623-634.
10. Cruden B. A. Absolute Radiation Measurements in Earth and Mars Entry Conditions *NATO TR RTO-EN-AVT-218* 2014 Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhodes Saint Genese, Belgium pp. 1-40.

11. Jacobs C. M., McIntyre T. J., Morgan R. G., Brandis A. M. and Laux C. O. Radiative Heat Transfer Measurements in Low-Density Titan Atmospheres *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 2015 Vol. 29, No 4, pp. 835-844.
12. Takayanagi H and Fujita K Absolute Radiation Measurements Behind Strong Shock Wave In Carbon Dioxide Flow for Mars Aerocapture Missions *43rd AIAA Thermophysics Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences* 2012, AIAA 2012-2744, pp. 1-12.
13. Brandis A. M., Johnston C. O. and Cruden B. A. Non-equilibrium Radiation for Earth Entry *46th AIAA Thermophysics Conference, AIAA AVIATION Forum* 2016 AIAA 2016-3690 pp. 1-19.
14. Liepmann H.W., Bowman R.M.: Shape of shock fronts in shock tubes. *Phys. Fluids* 7, 1964, pp. 2013–2015.
15. Morioka T., Sakurai N., Maeno K., Honma H. "Observation of Nonequilibrium Radiation behind Strong Shock Waves in Low-Density Air, *Journal of Visualization*", Vol. 3, No. 1, 2000, pp. 51-61.
16. Kozlov P.V., Makarov V.N., Pavlov V.A., Shatalov O.P., "Experimental investigation of CO vibrational deactivation in a supersonic cooling gas flow," *Shock Waves*, Vol. 10, 2000, pp. 191-195.
17. Bogdanoff D.W., and Park C. "Radiative Interaction Between Driver and Driven Gases in an Arc-Driven Shock Tube," *Shock Waves* . Vol. 12. 2002. pp. 205-214.
18. Kozlov P.V., Romanenko Yu.V., "Experimental Investigation of Shock Heated Air Radiation on the Double-Diaphragm Shock Tube," in Proceedings of the 3th All-Russian School-Workshop '*Aerophysics and Physical Mechanics of Classical and Quantum Systems*' AFM–2009. (in Russian)
19. Surzhikov S.T., Shang J.S., "eRC Model for Prediction of Molecular Bands Radiation for Stardust Entry Conditions," AIAA 2014-2490. 2014. 43 p.
20. Surzhikov S.T., Shang S.T., "Coupled Radiation-Gasdynamic Model for Stardust Earth Entry Simulation," *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2012. Vol. 49. No.5. pp.875-888.
21. Surzhikov S.T., "Comparison of Two Hybrid CR-Models for Prediction of Nonequilibrium Radiation from Strong Shock Waves," AIAA 2015-2513. 2015. 41 p.
22. Shang J.S., Surzhikov S.T., "Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation," *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. Vol.53. pp.46-65.
23. Kozlov P. V. and Surzhikov S. T. Nonequilibrium Radiation NO in Shocked Air (2017) *AIAA-2017-0157 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum* pp. 1-16

24. Г. Н. Залогин, П. В. Козлов, Л. А. Кузнецова, С. А. Лосев, В. Н. Макаров, Ю. В. Романенко, and С. Т. Суржиков. Излучение смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-Ar}$ в ударных волнах: эксперимент и теория. In *Препринт Института механики МГУ №40-98*, сс. 1–85. МГУ МГУ, 1998.
25. 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/>
26. 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/>
27. Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. — М.-Л.: Издательство АН СССР, 1947. — 148 с.
28. <http://specair-radiation.net/>
29. А. Гейдон, И. Герл. Ударная труба в химической физике высоких температур (перевод с английского). М.: Мир, 1966.
30. Формуляр «Система РЕГИСТРАЦИИ ЛЕГА», 2011.
31. А.Н. Зайдель, Г.В. Островская, Ю.И. Островский. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 56 - 62 с.
32. А. Гейдон. Энергии диссоциации и спектры двухатомных молекул (перевод с английского). М.: Издательство иностранной литературы, 1949.

Отчет №

О.П. Шаталов, П.В. Козлов, И.Е. Забелинский, Н.Г. Быкова, Ю.В. Акимов

Проведение экспериментов по измерению абсолютной интенсивности излучения УВ на установках УТС и УТД в воздухе и в смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ за фронтом сильных ударных волн

Отчет содержит 2 раздела, 36 страниц, 25 рисунков, 2 таблицы, 32 использованных источников.

Ключевые слова: ударная труба, ударные волны, спектральная плотность энергетической яркости, эксперимент абсолютное излучение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

Объект исследования: высокотемпературные газовые потоки.

Цели работы: исследование радиационных свойств воздуха и смеси моделирующей атмосферу Марса при скоростях ударной волны 4-10 км/с

Методология проведения работы:

при проведении работ использованы современные представления о процессах, протекающих за фронтом ударной волны в высокотемпературном воздухе и смесях моделирующих атмосферу Марса.

На ударных трубах УТД и УТС Института механики МГУ за фронтом сильных ударных в смесях, моделирующих марсианскую ($\text{CO}_2 - \text{N}_2$) и воздушную ($\text{N}_2 - \text{O}_2$), атмосферы, измерено относительное и абсолютное излучение в видимом, ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Начальное давление перед фронтом ударной волны составляло 0,3 - 1 Торр, скорость ударной волны достигала 10 км/с.

Результаты работы:

Получены экспериментальные данные о свойствах неравновесного излучения оксида азота для скоростей 4-10 км/с; проведено качественное и количественное сравнение модельными расчетами.

Область применения:

Физическая газодинамика, спектральные измерения высокотемпературных потоков газа и плазмы.