

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНО НАГРЕТОГО ВОЗДУХА

П.В. Козлов, Ю.В. Романенко

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

Аннотация

Приводятся результаты исследования временного поведения излучения основных излучающих молекулярных компонент, в смесях моделирующих атмосферу Земли с временным разрешением 10^{-8} сек. Измеренные длительности излучения неравновесных пиков излучения составляют менее 0.3 мкс при скоростях выше 7 км/с и начальном давлении 0.25 Торр. При скоростях выше 7.4 км/с в определенных спектральных диапазонах наблюдается опережающее фронт ударной волны излучение.

STUDY TIME CHARACTERISTICS EMISSION OF SHOCK HEATED AIR

Pavel V. Kozlov, Yuri V. Romanenko

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

The results of the study the temporal behavior of the radiation-emitting major molecular component of the mixture modeling the Earth's atmosphere with a time resolution of 10 ns. Duration of the emission peaks of nonequilibrium radiation is less than 0.3 microseconds for speed of shock waves above 7 km/s and an initial pressure of 0.25 Torr. On the speeds of shock waves above 7.4 km/s in certain spectral ranges observed the precursor radiation.

1. ВЕДЕНИЕ

Работа является продолжением исследований радиационных характеристик ударно-нагретых газовых смесей моделирующих атмосферы планет солнечной системы Земли, Венеры и Марса [1–5]. В настоящее время в мире аналогичные исследования радиационных потоков за фронтом сильной ударной волны моделирующих атмосферы планет и спутников планет солнечной системы проводятся только в четырех лабораториях мира. В США в исследовательском центре НАСА на электроразрядной ударной трубе [6]. В королевском университете Австралии на ударной трубе X2 работающей по принципу свободно толкаемого поршня (free piston) [7]. В Японии на ударных трубах со свободно толкаемым поршнем [8]. В трех приведенных выше исследовательских группах измерение временной эволюции излучения проводится с помощью получения изображения светящейся ударной волны за короткое время (порядка $0.1 \div 1$ мкс) стробирования ICCD камеры. Это позволит в одном эксперименте получать спектральное распределение излучения за фронтом ударной волны в абсолютных единицах по времени (пространству). Однако пространственное разрешение такой системы с учетом фокусирующей оптики составляет порядка 2 мм в лучшем случае. Такое пространственное разрешение при скорости ударной волны 8 км/с дает временное разрешение 0.25 мкс. Однако в определенных условиях протяженность неравновесного излучения может быть менее 0,1 мм [9]. В исследованиях, проводимых в институте механики МГУ на установках УТД [5] и УТС [10] регистрируется интегральное по пространству излучение ударно нагретого газа в широком спектральном диапазоне с помощью ICCD и CCD приемников в абсолютных единицах спектральной плотности излучения, а

изменение во времени регистрируется с помощью ФЭУ. Такая схема измерений имеет более высокую чувствительность, но требует проведения нескольких экспериментов при идентичных условиях. Также достигается временное разрешение системы регистрации порядка 10 нс, без учета кривизны фронта ударной волны. Влияние кривизны фронта ударной волны на временное разрешение системы регистрации с помощью фотоумножителя рассматривается в работе [11].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки подробно описана в работе [5]. Использовались два канала регистрации излучения. В первом канале излучение с высоким пространственно-временным разрешением регистрировалось фотоумножителем. Временное разрешение определялось амплитудно-частотными характеристиками фотоумножителя, и регистрирующего осциллографа, а пространственное используемой собирающей оптикой – входной щелью спектрографа и апертурной диафрагмой на собирающей линзе.

Основное отличие используемой в экспериментах системы регистрации от описанной в работе [5] состоит в использовании во втором канале спектрографа на область длин волн $190 \div 670$ нм. Характеристики канала регистрации с ФЭУ подробно описаны в работе [11].

3. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СМЕСИ N_2-O_2

Ниже изложены результаты экспериментального исследования временных зависимостей излучения основных молекулярных компонент N_2-O_2 смеси моделирующей атмосферу Земли. Согласно паспортным данным используемых кислорода и азота содержание водорода содержащих примесей не превышает 0.0025 %, а углерод содержащих примесей 0.0011 %.

В табл. 1 приводятся данные условий экспериментов проведенных в модельном воздухе при скоростях ударной волны, близких к первой космической. В таблице приводятся: номер эксперимента; начальное давление смеси P_1 ; скорость ударной волны в измерительном сечении между датчиками P7 и P8, где прово-

дились временные измерения; спектральный диапазон, в котором проводились временные измерения; напряжение питания ФЭУ-100; скорость ударной волны в измерительном сечении между датчиками P9 и P10, где регистрировался панорамный спектр излучения в диапазоне длин волн $190 \div 670$ нм.

Таблица 1

Условия экспериментов по исследованию временных характеристик излучения воздушной смеси выполненные на установке УТД

№ Эксп.	Состав	P_1 , Торр	V_{sw}^{7-8} , км/с	λ nm	U , В (ФЭУ-100)	V_{sw}^{9-10} , км/с
670	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.41	235.3 ± 4.4	1800	7.47
671	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.46	313.33 ± 4.4	1700	7.40
672	N ₂ :O ₂ =4:1	0.26	7.46	425.33 ± 4.4	1700	7.55
673	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.58	387.33 ± 4.4	1500	7.65
674	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.46	235.33 ± 4.4	1850	7.38
675	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.46	313.33 ± 4.4	1750	7.47
676	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.30	313.33 ± 4.4	1750	7.19
677	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.52	313.33 ± 4.4	1750	7.74
678	N ₂ :O ₂ =4:1	0.25	7.58	213.33 ± 4.4	1800	7.51
679	N ₂ :O ₂ =4:1	0.26	7.46	353.33 ± 4.4	1600	7.51
691	Воздух	0.26	7.46	200 ÷ 850	1600	7.45

Пример зависимости спектральной плотности излучения от длины волны для различных скоростей ударной волны представлен на рис.1. В спектре идентифицируются молекулярные полосы азота (вторая положительная система), иона азота (первая отрицательная система), окиси азота (NO γ , Δ , ϵ -систем) и циана (фиолетовая система полос). Спектральная область от 380 до 1100 нм с указанием наблюдаемых ($\lambda > 670$ нм) в основном атомарных линий была представлена в работе [5].

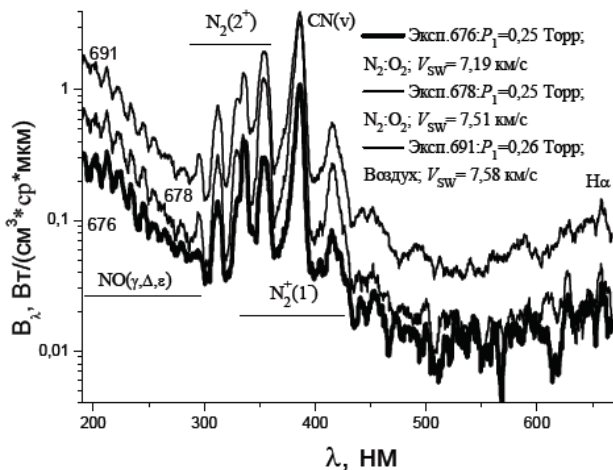


Рис. 1. Спектральная плотность излучения ударно-нагретого модельного воздуха (N₂:O₂ = 4:1, эксперименты №675, №678) и атмосферного воздуха

Из атомарных компонент в этой спектральной области наблюдается слабая линия атомарного водорода H α , обусловленная наличием малой примеси (~0.0025 %) водород содержащих компонент в исследуемом газе. Также наблюдается линия атома кислорода на длине волны 626.2 нм.

Показанный на рис.1 спектр атмосферного воздуха имеет такой же характерный вид. Разница в интенсивностях связана с различием в скоростях ударной волны и составе газа.

Следует отметить, что абсолютные значения спектральной плотности излучения, регистрируемые в этой серии экспериментов, удовлетворительно совпадают с данными, представленными в работе [5], хотя измерения проводились на различных спектрометрах и приемных камерах.

На рис. 2. показана временная зависимость излучения УВ воздуха, зарегистрированная в спектральном диапазоне 200 ÷ 850 нм. Для этого дифракционная решетка (1200 штрихов/мм) спектрографа устанавливалась в нулевой порядок. Время нарастания фронта составляет 90 нс, и длительность по полуширине – 290 нс. В соответствии с результатом этого эксперимента длительность излучения пробки при расчете спектральной плотности излучения, показанные на рис. 1, бралась равной 1 мкс.

На рис. 3–12 приведены осциллограммы временной зависимости излучения УВ смеси N₂:O₂ = 4:1 для различных диапазонов длин волн.

Анализ временного поведения излучения ударной волны в воздухе и его спектрального состава позволяет сделать следующие выводы:

Основная часть излучения – это неравновесное излучение.

Существуют спектральные диапазоны (313 нм излучение второй положительной системы азота), где уже при скоростях выше 7.4 км/с имеется значительное «предизлучение», опережающее газодинамический фронт на времена порядка микросекунды.

Небольшая (более 0.0025 %) примесь водорода дает регистрируемый сигнал линии H α , что при более высоких концентрациях водорода позволит регистриро-

вать линию H_{β} , по ширине которой можно определять концентрацию электронов.

Иллюстрация опережения излучения на длине волны 313.3 нм ударной волны газодинамического фронта показана на рис. 13. Исследование относительного расположения начала излучения для смесей $CO_2:N_2$ и $N_2:O_2$ для скоростей ударной волны ($5 \div 8$ км/с), пока-

зало, что при неизменной юстировке оптической схемы регистрация опережение сигналом ФЭУ середины интервала между сигналами датчиков Р7 и Р8 в подавляющем большинстве есть величина постоянная с точностью ± 100 нс [11].

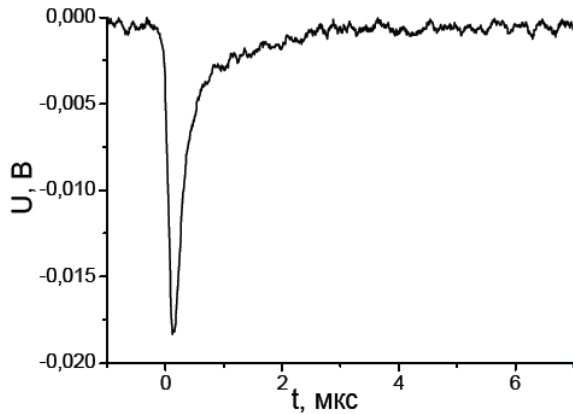


Рис. 2. Временная зависимость излучения УВ воздуха в нулевом порядке решетки спектрографа VM&50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): Эксп. № 691; $P_1=0.26$ Торр; $V_{sw}=7.46$ км/с

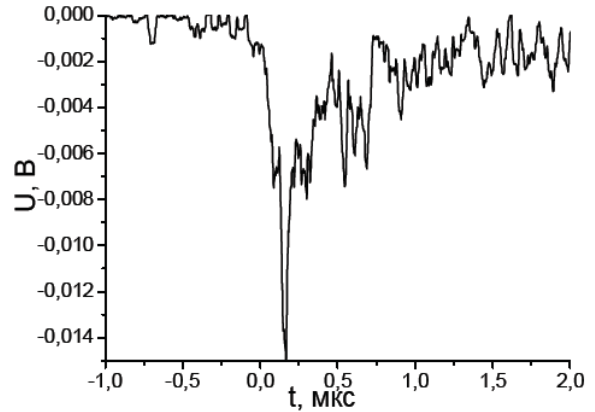


Рис. 5. Временная зависимость излучения УВ в смеси $N_2:O_2$ на длине волны 425.3 ± 4.4 нм ($N_2^+(1^-)$): Эксп. № 672; $p_1=0.26$ Торр; $V_{sw}=7.46$ км/с

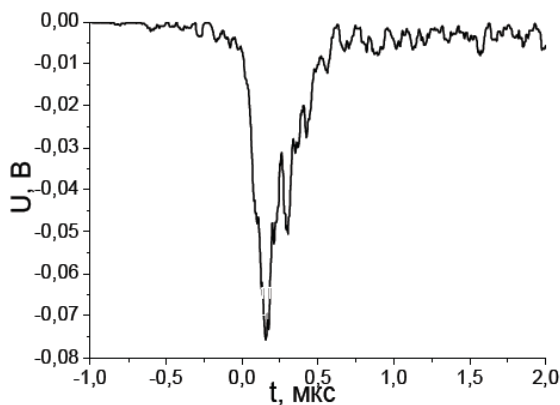


Рис. 3. Временная зависимость излучения УВ в смеси $N_2:O_2$ на длине волны 235.3 ± 4.4 нм (NO γ -system): Эксп. № 670; $p_1=0.25$ Торр; $V_{sw}=7.41$ км/с

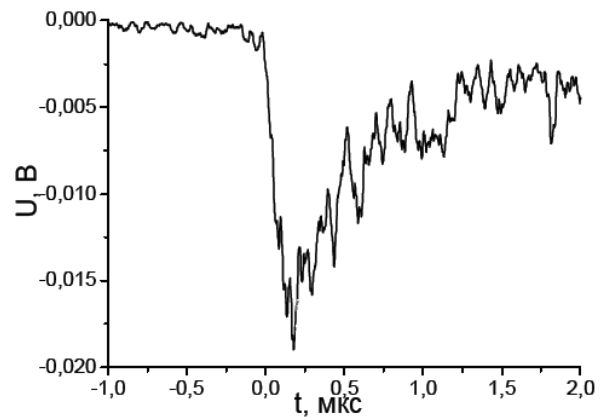


Рис. 6. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 387.3 ± 4.4 нм ($N_2^+(1^-)$ и CN фиолетовая система): Эксп. № 673; $p_1=0.25$ Торр; $V_{sw}=7.58$ км/с

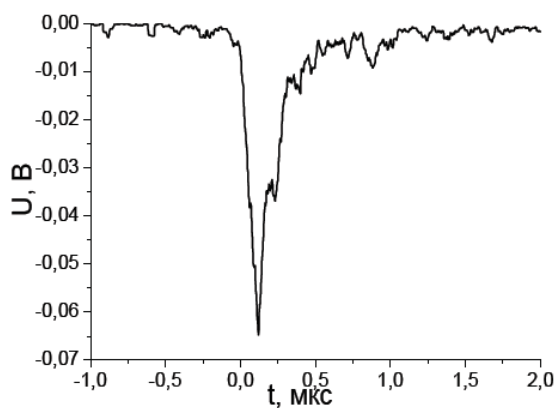


Рис. 4. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 313.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+)$): Эксп. № 671; $p_1=0.25$ Торр; $V_{sw}=7.46$ км/с

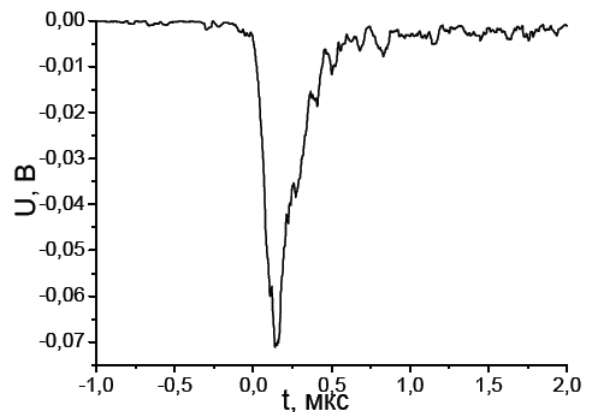


Рис. 7. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 235.3 ± 4.4 нм (NO γ -system): Эксп. № 674; $p_1=0.25$ Торр; $V_{sw}=7.46$ км/с

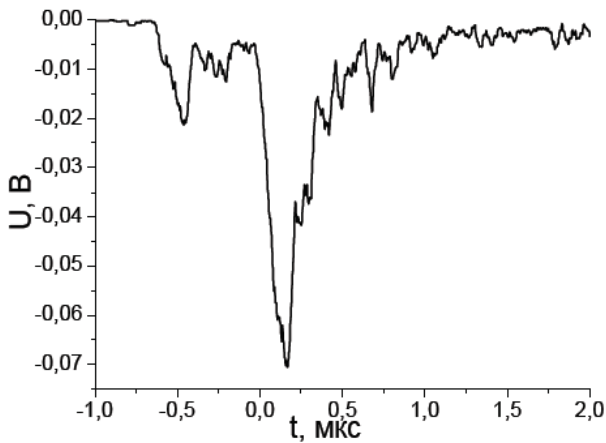


Рис. 8. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 313.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+)$): Эксп. № 675; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.46$ км/с

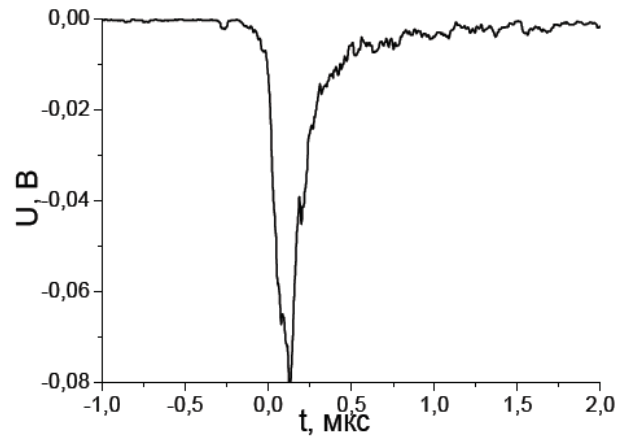


Рис. 11. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 213.3 ± 4.4 нм ($NO \gamma$ -system): Эксп. № 678; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.58$ км/с

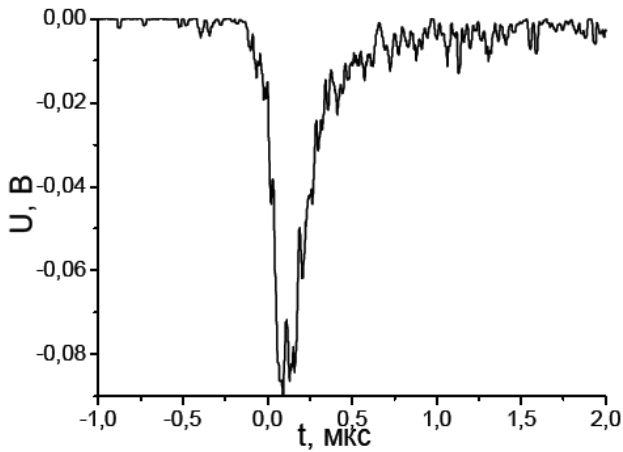


Рис. 9. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 313.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+)$): Эксп. № 676; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.3$ км/с

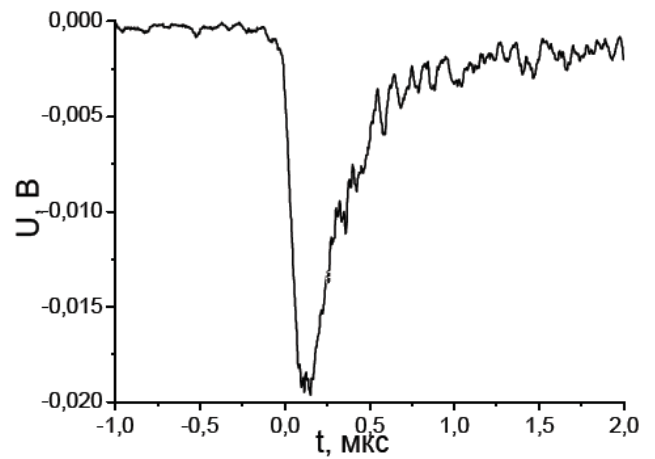


Рис. 12. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 353.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+$ и $N_2^+(1^-)$): Эксп. № 679; $p_1 = 0.26$ Торр; $V_{sw} = 7.46$ км/с

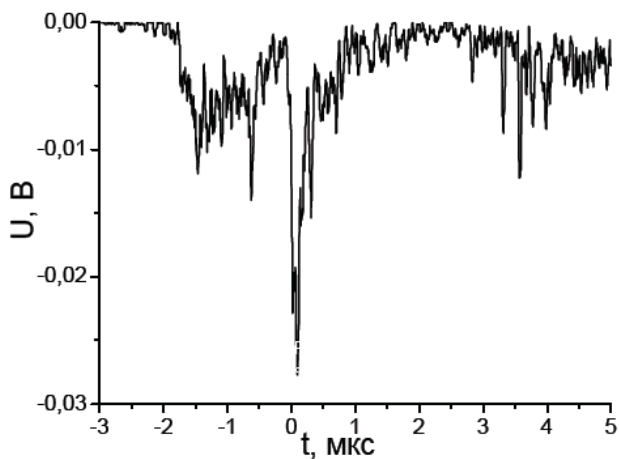


Рис. 10. Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 313.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+)$): Эксп. № 677; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.52$ км/с

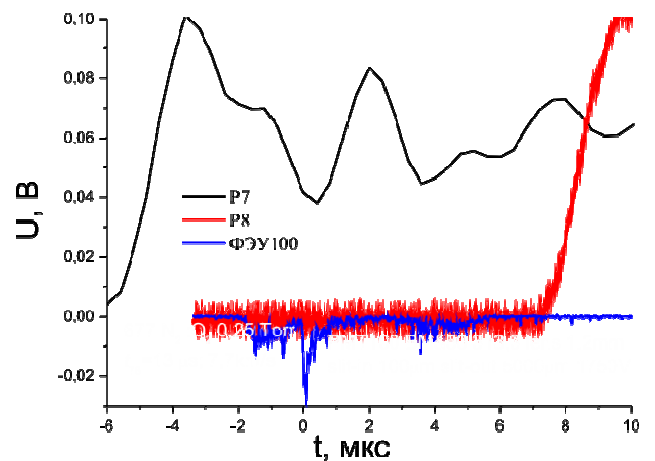


Рис. 13. – Временная зависимость излучения УВ смеси $N_2:O_2$ на длине волны 313.3 ± 4.4 нм ($N_2(2^+)$) и сигналы с пьезодатчиков P7, P8: Эксп. № 677; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.52$ км/с

4. ИЗЛУЧЕНИЕ СМЕСИ АРГОНА С КИСЛОРОДОМ И АЗОТОМ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 200 ÷ 850 НМ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Для повышения температуры газа в равновесной зоне за фронтом ударной волны можно использовать инертный газ, например аргон [1]. Так как на установке УТД в настоящее время максимально достижимая скорость составляет 8 км/с, то для повышения температур газа, возникающих при скоростях СА, близких ко второй космической скорости измерения выполнялись в смесях, содержащих 90% аргона.

Полученные панорамные спектры и временные осциллограммы излучения для смеси кислорода с аргонном в представлены на рис. 14–17.

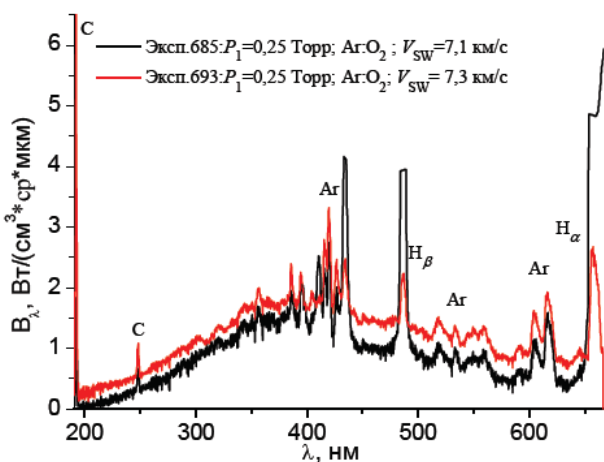


Рис. 14. Спектральная плотность излучения ударно нагретого кислорода в аргоне для двух различных скоростей ударной волны

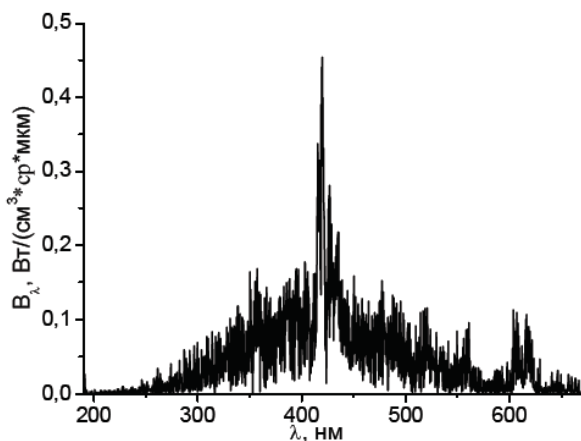


Рис. 15. Спектральная плотность излучения ударно нагретого кислорода в аргоне: Эксп. № 680; $p_1 = 1$ Торр; $V_{sw} = 5.85$ км/с

Представленные на рис. 14. спектральные плотности излучения за ударной волной в смеси $Ar:O_2 = 9:1$ похожи на излучение черного тела, на которое наложены атомарные линии углерода, аргона и водорода; часть линий уширены. Каких-либо следов излучения от молекулярных полос кислорода в спектрах не наблюдается, что обусловлено практически полной диссоциацией молекул кислорода за фронтом ударной

волны. Значительная величина интенсивностей линий H_α и H_β в эксперименте № 685 в отличие от эксперимента № 693 обусловлена малым временем откачки установки – менее 6 часов (эксперименты № 684 и № 685 проведены в один день как отладочные), в то время как время нахождения под вакуумом ударной трубы в эксперименте № 693 составляло 48 часов. Согласно паспортным данным для используемых кислорода и аргона содержание водород содержащих примесей не превышает 0.0007%, а углерод содержащих примесей 0.0003%.

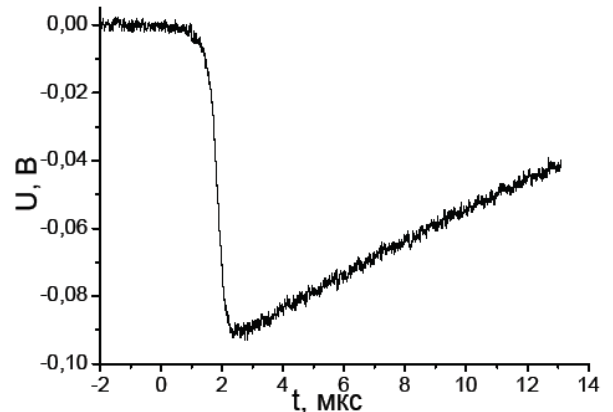


Рис. 16. Временная зависимость излучения УВ смеси $Ar:O_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): Эксп. № 680; $p_1 = 1$ Торр; $V_{sw} = 5.99$ км/с

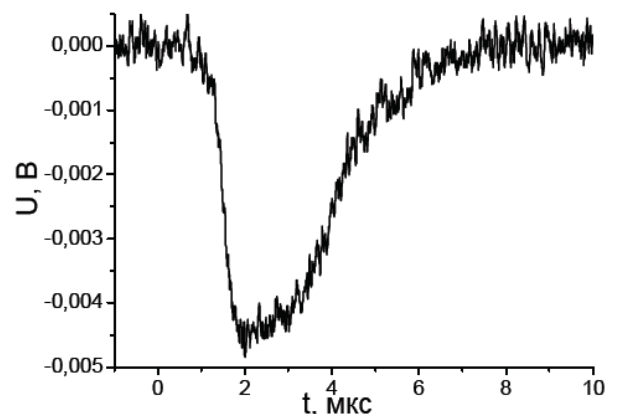


Рис. 17. Временная зависимость излучения УВ смеси $Ar:O_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): Эксп. № 693; $p_1 = 0.25$ Торр; $V_{sw} = 7.46$ км/с

При скорости ударной волны менее 6 км/с эксперимент № 680 (рис. 15.) интенсивность излучения падает на порядок, в спектре отсутствуют атомарные линии углерода и водорода. Временная зависимость излучения как в области вакуумного ультрафиолета [10] так и в спектральной области 200 ÷ 850 нм (рис. 16. и рис. 17.) имеет быстрое нарастание длительностью порядка 1 мкс, задержанное относительно газодинамического фронта, и более медленный линейный спад интенсивности излучения.

Наблюдаемые в спектрах излучения атомарные линии углерода на длинах волн 193 нм и 247 нм позволяют оценить температуру газа по спектрам, представ-

ленным на рис. 14. для экспериментов №685 ($T \sim 10800$ K) и № 693 ($T > 14000$ K). Ширина линии H_{β} измеренная для эксперимента № 693, дает оценку концентрации электронов $N_e \sim 5 \pm 2 \times 10^{16}$. Данные о зависимости ширины линии H_{β} от концентрации электронов взяты из работы [12]. При использовании спектрографа с более высоким спектральным разрешением ~ 2 нм/мм, (в данной серии экспериментов дисперсия составляет 17 нм/мм) позволит определить концентрацию электронов с более высокой точностью.

В табл. 2. приводятся данные условий экспериментов, проведенных в модельном воздухе с аргоном

(90 %) при скоростях ударной волны, близких к первой космической. В таблице приводятся: номер эксперимента; начальное давление смеси P_1 ; скорость ударной в измерительном сечении между датчиками P7 и P8, где проводились временные измерения; спектральный диапазон, в котором проводились временные измерения; напряжение питания ФЭУ-100; скорость ударной волны в измерительном сечении между датчиками P9 и P10, где регистрировался панорамный спектр излучения. Также в таблице приведение данные полученные при обработке спектров – температура газа и концентрация электронов, о чем речь пойдет ниже.

Таблица 2

Условия экспериментов по исследованию временных характеристик излучения воздушной смеси, разбавленной 90 % аргона, выполненные на установке УТД

№ Эксп.	Состав	P_1 , Торр	V_{sw}^{7-8} , км/с	λ , нм	$T(193\ 247\ \text{нм})$ К	$N_e (H_{\beta})$ см ⁻³	$U, V(\text{ФЭУ-100})$	V_{sw}^{9-10} , км/с
687	Ar:N ₂ :O ₂ =90:8:2	0.25	6.85	200 ÷ 850	10700	$(5 \pm 2) \times 10^{16}$	800	6.58
688	Ar:N ₂ :O ₂ =90:8:2	0.25	7.29	200 ÷ 850	13200	$(5 \pm 2) \times 10^{16}$	850	6.92
689	Ar:N ₂ :O ₂ =90:8:2	0.25	7.48	200 ÷ 850	> 14000	$(5 \pm 2) \times 10^{16}$	1000	7.04
690	Ar:N ₂ :O ₂ =90:8:2	0.25	7.35	200 ÷ 850	> 14000	$(5 \pm 2) \times 10^{16}$	1200	7.19

Согласно паспортным данным используемых газов для этой серии экспериментов количество водородосодержащих примесей не превышает 0,001%, а углеродсодержащих примесей 0,0002%.

Представленные на рис. 18. спектральные плотности излучения за ударной волной в смеси Ar:N₂:O₂=90:8:2 имеют вид, в котором на излучение, похожее на излучение черного тела, наложены атомарные линии углерода, аргона и водорода; часть линий уширены. В качестве примера на рис. 18.приведена зависимость излучения черного тела (BB7500K) произвольной амплитуды, $T_{BB}=7500$ K. Это излучение, по-видимому, обусловлено свободно-свободными и свободносвязанными переходами. Каких либо следов излучения от молекулярных полос в спектрах не наблюдается. Вероятнее всего, интенсивность этих полос скрыта излучением, похожим на излучение черного тела. На это же указывает и практически идентичный характер спектра для смеси аргона с кислородом, показанный на рис. 19., эксперимент № 685 и № 693, и спектра воздуха, разбавленного аргоном, эксперимент № 687

Длительности излучения пробки газа за фронтом волны при расчете спектральной плотности излучения на рис. 18. определялись по рис. 20–23.

Характерной особенностью зависимости интегральной интенсивности излучения от времени является задержка излучения относительно газодинамического фронта. Однако в ряде экспериментов (№ 687 и № 688) регистрируются небольшие (< 10% от максимума) пики излучения, совпадающие с приходом газодинамического фронта и длительностью менее 1 микросекунды. Это излучение, по-видимому, обусловлено излучением молекулярных полос, так как оно по началу времени возникновения и длительности совпадает с излучением, которое наблюдается в воздухе, не разбавленном аргоном.

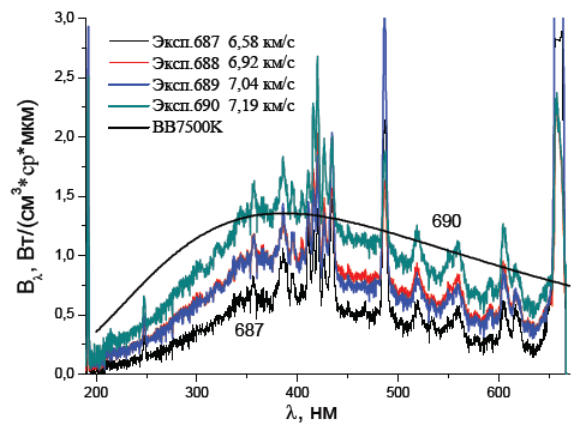


Рис. 18. Спектральная плотность излучения ударно нагретого модельного воздуха в аргоне (Ar:N₂:O₂=90:8:2): $P_1=0.25$ Торр

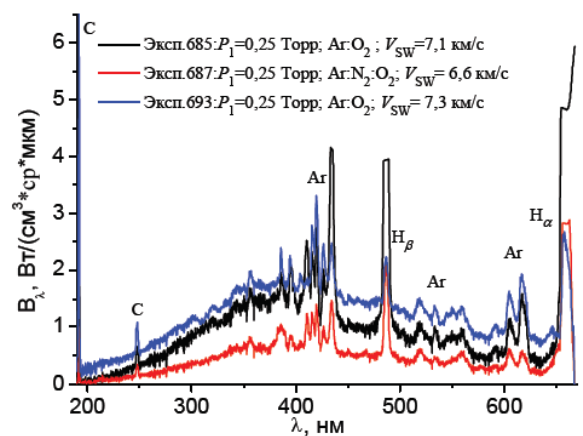


Рис. 19. Сравнение форм спектральной плотности излучения ударно нагретого кислорода в аргоне Ar:O₂=9:1 и модельного воздуха в аргоне Ar:N₂:O₂=90:8:2

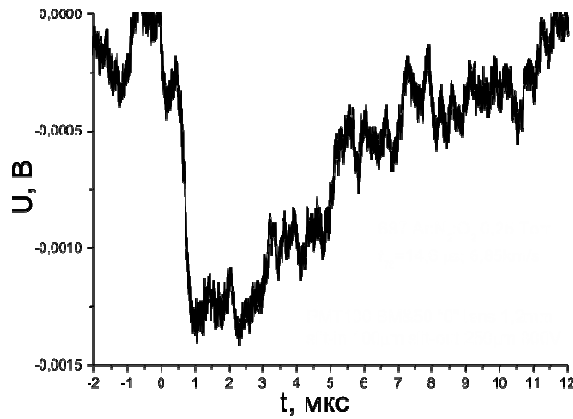


Рис. 20. Временная зависимость излучения УВ смеси $\text{Ar}:\text{N}_2:\text{O}_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): эксп. № 687, $p_1 = 0.25$ Торр, $V_{\text{sw}} = 6.85$ км/с

Отчего зависит величина задержки основного вклада в излучение, пока установить не удалось. Также не установлено, с чем связано наличие двугорбой структуры излучения, особенно ярко выраженной на рис. 21. Аналогичное двугорбое поведение излучения наблюдается и в спектральной области 120 ÷ 180 нм [10].

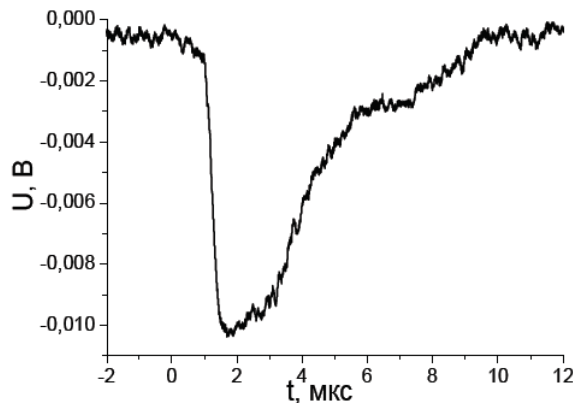


Рис. 21. Временная зависимость излучения УВ смеси $\text{Ar}:\text{N}_2:\text{O}_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): эксп. № 688, $p_1 = 0.25$ Торр, $V_{\text{sw}} = 6.85$ км/с

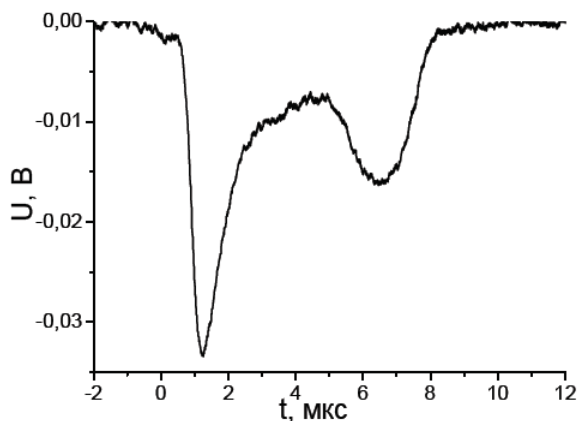


Рис. 22. Временная зависимость излучения УВ смеси $\text{Ar}:\text{N}_2:\text{O}_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): эксп. № 689, $p_1 = 0.25$ Торр, $V_{\text{sw}} = 7.48$ км/с

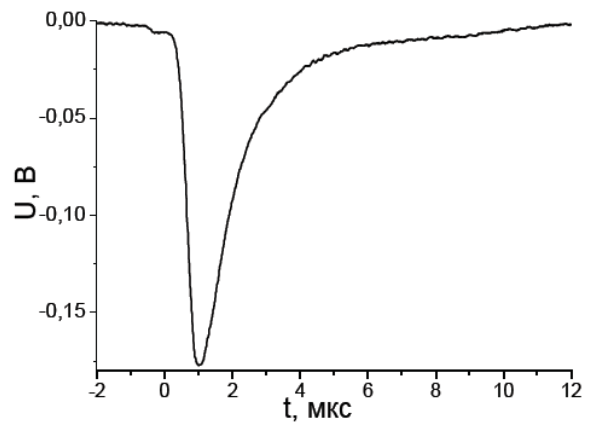


Рис. 23. Временная зависимость излучения УВ смеси $\text{Ar}:\text{N}_2:\text{O}_2$ в нулевом порядке решетки спектрографа V&M50, спектральный диапазон (200 ÷ 850 нм): эксп. № 690, $p_1 = 0.25$ Торр, $V_{\text{sw}} = 7.35$ км/с

Наблюдаемые в спектрах излучения атомарные линии углерода на длинах волн 193 нм и 247 нм позволяют оценить температуру газа по спектрам, представленным на рис. 18. Ширина линии H_β , измеренная по этим спектрам, дает оценку концентрации электронов N_e . В табл. 2. приведены оценочные значения температуры газа и концентрации электронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ временного поведения излучения ударной волны в смеси воздуха с аргонном и его спектрального состава позволяет сделать следующие выводы:

Характер излучения смеси воздуха сильно разбавленной аргонном существенно отличается от *характера* излучения воздуха по длительности и форме.

Момент нарастания основного вклада в интегральное излучение (200 ÷ 850 нм) задержан относительно газодинамического фронта

По отношению интенсивностей линий углерода на длинах волн 193 и 247 нм возможно оценить температуру ударной волны для температур до 14000 К.

Небольшая (более 0.001 %) примесь водорода дает регистрируемый сигнал линии H_β , по которому можно определить концентрацию электронов в ударной волне для смеси.

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

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

УТД – ударная труба двухдиафрагменная;

УТС – ударная труба средняя;

ФЭУ – Фото Электронный Умножитель;

ICCD – Intensifier Charge Coupled Device;

CCD – Charge Coupled Device;

P_1 – начальное давление исследуемого газа;

V_{sw}^{7-8} – скорость ударной волны в сечении между датчиками P7 и P8;

V_{sw}^{9-10} – скорость ударной волны в сечении между датчиками P9 и P10;

V_λ – спектральная плотность излучения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залогин Г.Н., Козлов П.Н., Кузнецова Л.А., Лосев С.А., Макаров В.Н., Романенко Ю.В., Суржиков С.Т. Излучение смеси CO₂-N₂-Ar в ударных волнах: эксперимент и теория//ЖТФ. 2001. Т. 71. № 6. С.10–16.
2. 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).
3. Dikalyuk A.S., Surzhikov S.T., Shatalov O.P., Kozlov P.V., and Romanenko Yu.V. // Nonequilibrium radiation behind the strong shock waves in marsian and titan atmospheres: Numerical rebuilding of experimental data/ 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA paper 2012-0795, 10, Pp. 9–12, January 2012, Nashville, Tennessee.
4. Dikalyuk A.S., Kozlov P.V., Romanenko Yu.V., Shatalov O.P., Surzhikov S.T. Nonequilibrium Spectral Radiation Behind the Shock Waves in Martian and Earth Atmospheres// 44th AIAA Thermophysics Conference, AIAA paper 2013-2505, 10, Pp. 24–27 June 2013, San Diego, California.
5. Козлов П.В., Романенко Ю.В. //Ударная труба института механики мгу для исследования радиационных процессов в высокотемпературных газовых потоках /Сборник трудов школы-семинара “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем”. М.: Школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» 2012, с. 60–64.
6. Jay H. Grinstead, Michael C. Wilder, Daniel C. Reda, Brett A. Cruden and David W. Bogdanoff//Advanced Spectroscopic and Thermal Imaging Instrumentation for Shock Tube and Ballistic Range Facilities/ RTO-EN-AVT-186, ARC-E-DAA-TN1396, Aerothermodynamic Design, Review on Ground Testing and CFD; 29 Mar.–1 Apr. 2010; Genese; Belgium.
7. Brandis A.M., Morgan R.G., McIntyre T.J., and Jacobs P.A. //Nonequilibrium Radiation Intensity Measurements in Simulated Titan Atmospheres/ Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 24 No 2, 2010, Pp. 291–300.
8. Takayanagi, H. ; Fujita, K.// Absolute Radiation Measurements behind Strong Shock Wave in Carbon Dioxide Flow for Mars Aerocapture Missions/43th AIAA Thermophysics Conference, AIAA paper 2012-2744, 7, Pp. 25–28, June 2012, New Orleans, Louisiana.
9. Bremare N., Huynh S-Y., Boubert P. Non-Equilibrium Radiation Calculations Behind Shock Waves in CO₂-N₂ 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).
10. Быкова Н.Г., Герасимов И.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Шаталов О.П. Исследование ударно-нагретого воздуха в спектральной области 120÷180 нм: панорамный спектр и эволюция излучения за фронтом ударной волны. Сборник трудов школы-семинара “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем”. М.: Школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» 2013, с. 1–8.
11. Козлов П.В., Романенко Ю.В. //Определение положения газодинамического фронта ударной волны /Сборник трудов школы-семинара “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем ”. М.: Школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» 2013, с. 1–8.
12. M.A. Gigosos, M.Á. González, V. Cardeñoso //Computer simulated Balmer alpha, beta and equilibrium plasmas diagnostics/ Spectrochimica Acta Part B, 58 (2003). Pp. 1489–1504.