

# Исследование спектральных характеристик излучения теплового следа оптического пульсирующего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха

А.Н.Малов, А.М.Оришич, Я.С.Терентьева

*Исследованы спектральные характеристики теплового следа оптического пульсирующего разряда (ОПР) в сверхзвуковом потоке воздуха. Возникновение ОПР происходило под действием излучения импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера с механической модуляцией добротности при частоте следования импульсов 7–150 кГц и мощности до 4.5 кВт. Поток создавался с помощью сверхзвуковой аэродинамической установки МАУ-М при использовании конического сопла с размером критического сечения 50 мм при числе Маха 1.3–1.6. Подробно описана система оптической диагностики, позволяющая зафиксировать спектр слабого свечения теплового следа на фоне мощного излучения ОПР. Было обнаружено, что свечение теплового следа вызвано излучением атомов и ионов азота и кислорода, которые в виде облаков горячего газа низкой плотности (каверн) переносятся потоком. Представлены длины волн излучения теплового следа и данные по переходам, соответствующим линиям спектра.*

**Ключевые слова:** оптический пульсирующий разряд, тепловой след, каверна, сверхзвуковой поток воздуха.

## 1. Введение

Одним из перспективных направлений применения лазерного излучения является изучение физических процессов, определяющих свойства оптического пульсирующего разряда (ОПР) в сверхзвуковом потоке воздуха. Такие исследования важны при решении задач управления аэродинамическими параметрами летательных аппаратов, плазмохимии и т. п. [1–3]. Динамика формирования лазерной искры в неподвижном воздухе и гидродинамическая релаксация облака горячего газа исследованы достаточно хорошо [4, 5]. Наблюдалось формирование практически сферической ударной волны и относительно медленное радиальное расширение светящейся области нагретого ионизованного газа или плазмы. В работах [6–10] был получен ОПР, который зажигался в фокусе пучка излучения импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера в сверхзвуковой струе аргона и воздействовал на поток аналогично непрерывному оптическому разряду. В работе [11] представлен, с высоким разрешением (0.01–0.005 нм), типичный спектр излучения ОПР, горящего при облучении стали, находящейся в струе воздуха.

С созданием мощного импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера [12] открылись возможности зажигания ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха на реальных аэродинамических установках и исследования характеристик формируемого теплового следа. При мощности лазера до 4 кВт и частоте следования импульсов до 120 кГц в работе [13] получены значения среднемаховой температуры воздуха внутри теплового следа ~120°C–150°C в непосредственной близости от плазмоида (на расстоянии ~5 мм). В этих

экспериментах также было зарегистрировано свечение теплового следа (размером около 50 мм), которое не могло определяться указанной температурой газа в струе. Однако это свечение могло быть связано со свечением каверн, возникающих в потоке в процессе импульсно-периодического пробоя газа излучением лазера и сохраняющихся в течение ~100 мкс. В последующих работах [14–16] исследовалась структура теплового следа. Теневым методом с временем экспозиции 0.15 мкс были определены форма, размеры и скорость каверн, а также зафиксировано интегральное по спектру свечение таких образований в тепловом следе.

Однако, несмотря на большое число работ, в которых исследуется оптический пробой воздуха, нет ясного понимания элементарных физических процессов, определяющих время жизни и релаксацию энергии плазмы. Например, экспериментальные исследования спектров излучения плазмы осуществлялись интегрально по времени [17–19] или по измерению свечения отдельных участков сплошного спектра [20], что не позволяло изучить процессы, обуславливающие свойства поздней стадии эволюции облака при переходе от адиабатического его расширения к изобарическому.

Цель настоящей работы – получить данные о пространственно-временных спектральных характеристиках оптического излучения сверхзвуковой струи воздуха после воздействия на нее ОПР с высоким спектральным разрешением.

## 2. Экспериментальная установка и методики исследования

В работе использовался импульсно-периодический CO<sub>2</sub>-лазер с механической модуляцией добротности при частоте следования импульсов до 150 кГц и мощности до 4.5 кВт [12]. Импульсная мощность лазера в зависимости от условий модуляции составляла 60–200 кВт. Схема проведения экспериментов приведена на рис.1. Экспериментальные исследования выполнялись на сверхзвуковой

А.Н.Малов, А.М.Оришич, Я.С.Терентьева. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: laser@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 20 апреля 2015 г., после доработки – 10 августа 2015 г.

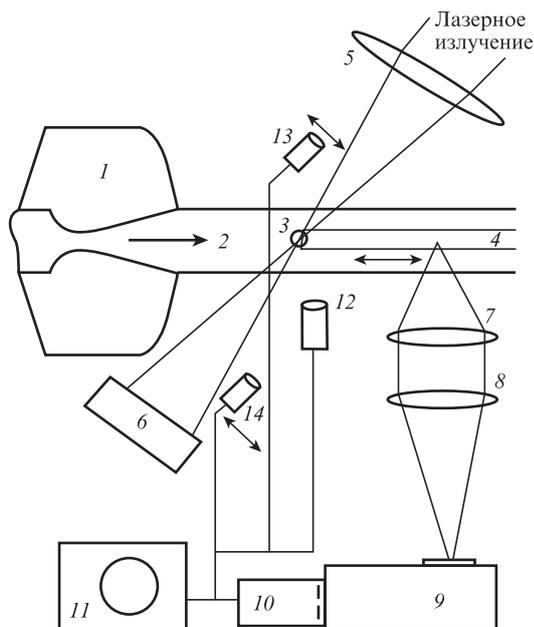


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – коническое сопло; 2 – сверхзвуковой поток; 3 – область оптического пробоя воздуха; 4 – тепловой след; 5 – линза из материала ZnSe; 6 – калориметрический измеритель мощности; 7, 8 – линзы оптического тракта; 9 – спектрометр CCS-200; 10 – ПЗС-камера; 11 – цифровой осциллограф; 12 – коаксиальный фотоэлемент; 13, 14 – фотодиоды ФД-24К.

аэродинамической установке МАУ-М с использованием конического сопла 1 с размером критического сечения потока 50 мм (2) при числе Маха 1.3–1.6. Излучение лазера через линзу 5 из материала ZnSe с фокусным расстоянием 63 мм поступало на осевую линию сверхзвуковой струи перпендикулярно потоку газа. Диаметр пятна в фокусе линзы составлял 100–150 мкм, что обеспечивало пиковую интенсивность в оптимальном режиме работы лазера  $(7-15) \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и оптический пробой воздуха (область 3) в сверхзвуковой струе. Лазерное излучение на выходе из струи и зоны плазмообразования поглощалось калориметрическим измерителем мощности NOVA 2 с пределом измеряемой мощности до 5 кВт (6). На рис.2 приведена фотография рабочей зоны установки с оптическим разрядом в сверхзвуковом потоке воздуха. Видны срез сопла, яркий шарообразный плазмоид и тепловой след с более слабым свечением, которое несколько усилено в конце следа.

Для проведения визуальных наблюдений процесса формирования плазмы в сверхзвуковом потоке и создаваемого ею теплового следа установка была оснащена си-

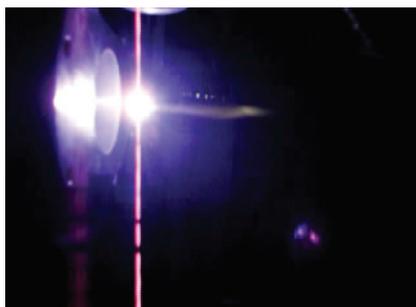


Рис.2. Фотография рабочей части установки с включенным ОПР.

стемой оптической диагностики. Использовалась оптическая схема измерения слабого сигнала излучения теплового следа на фоне мощного свечения плазмоида, которая включала в себя оптический тракт 7, 8, передающий изображение точки пространства теплового следа 4 на входную щель регистратора 9. Измерения спектра излучения теплового следа после воздействия ОПР выполнялись с помощью спектрометра CCS-200 со спектральным разрешением не более 2 нм, которое было ограничено необходимостью использовать высокоскоростной режим работы камеры с минимальным временем открытия ее затвора до 10 мкс и максимальной для нее частотой следования кадров при регистрации в кадре широкого интервала длин волн (245–1050 нм). Оптическая система обеспечивала пространственное разрешение в объеме теплового следа  $\sim 100$  мкм. Для измерения динамики поглощения энергии в зоне оптического разряда использовались фотодиоды ФД-24К (13, 14), регистрирующие падающее и прошедшее лазерные излучения соответственно, и коаксиальный фотоэлемент ФК-22 (12), регистрирующий свет плазмоида. Электрические сигналы фотоприемников фиксировались осциллографом 11.

Для измерений спектра свечения каверн в тепловом следе была разработана специальная электронная схема, позволяющая выделить слабое излучение следа на фоне мощного свечения плазмоида. С помощью этой схемы вырабатывался импульс управления для включения спектрометра только в момент прохождения каверны через измерительный объем, формируемый линзами 7 и 8 (рис.1), а также проводилось интегрирование излучения на спектрометре за это время и накопление света от большого (50–100) числа каверн, прошедших через область регистрации. Время работы спектрометра при каждом включении составляло 10–15 мкс. Таким образом, происходило увеличение чувствительности спектрометра до необходимого уровня при его оптической изоляции от мощного света плазмоида. Для расшифровки спектров использовались данные работ [17, 19, 21].

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.3 показаны типичные осциллограммы падающего и прошедшего лазерных излучений, а также свечения плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха. Видно, что яркое свечение длится менее 1 мкс и его интенсивность существенно (на несколько порядков) превышает интен-

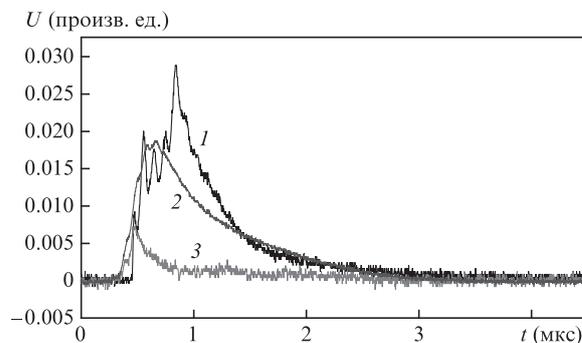


Рис.3. Осциллограммы интегрального свечения плазмоида (1), а также импульсов падающего (2) и прошедшего через плазмоид (3) излучения лазера.

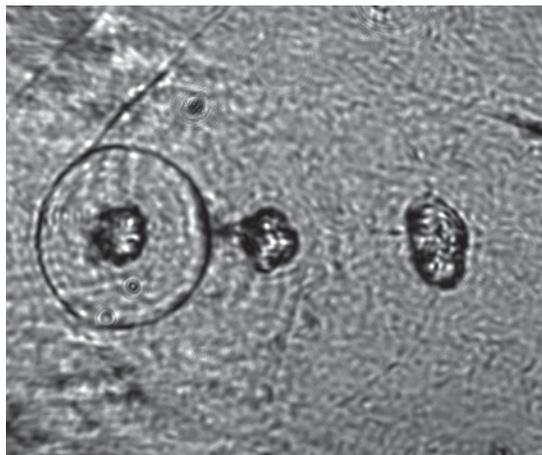


Рис.4. Теневая фотография структуры каверн и ударных волн при формировании ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха. Время регистрации 0.15 мкс, скорость потока 500 м/с, частота 60 кГц.

сивность свечения теплового следа. В течение последующих 100 мкс горячее облако очень низкой плотности (каверна) смещается в потоке на расстояние ~50 мм. На рис.4 представлена типичная структура ударных волн и каверн теплового следа, формируемая в сверхзвуковом потоке воздуха при включении ОПР (частота 60 кГц, время регистрации 150 нс). Видно, что тепловой след представляет собой последовательность каверн, границы которых деформируются в процессе движения, что обуславливает не только диффузионное, но и конвективное их остывание. При скорости потока 500 м/с расстояние между кавернами составляло ~8.5 мм, а их диаметр был равен 3–4 мм. Таким образом, каверна пролетала мимо точки регистрации за время ~6 мкс. При времени регистрации спектра 10–15 мкс подбором расстояния и времени включения спектрометра CCS-200 осуществлялось измерение спектра. В этих условиях для исключения влияния свечения плазмы при регистрации спектра излучения каверн интервал времени между двумя вспышками плазмы выбирался большим 50 мкс (частота следования импульсов менее 10 кГц). Спектр измерялся в нескольких точках, как в области формирования плазмоида, так и вдоль теплового следа (на расстояниях 12, 25 и 50 мм от центра плазмоида).

На рис.5 приведен спектр излучения плазмоида. Отметим, что при регистрации этого спектра, т.е. в течение времени работы камеры (~10 мкс), происходит усреднение свечения на всех начальных этапах развития плаз-

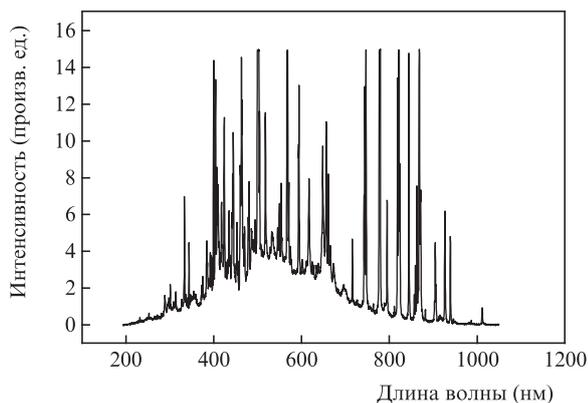


Рис.5. Характерный спектр излучения плазмоида.

моида. Таким образом, в формировании спектра принимают участие различные процессы, приводящие к появлению сильных спектральных линий молекул, атомов и ионов азота и кислорода, излучающих в УФ, видимой, красной и ближней ИК областях.

Так, согласно данным работы [6], в условиях нашего эксперимента, т.е. при энергии в импульсе 0.25 Дж, переход (после пробоя) от быстрого адиабатического расширения и охлаждения горячей плазмы к медленному изобарическому расширению и охлаждению происходит через 1–2 мкс. В это время наблюдается интенсивное свечение (см. рис.3), которое и вносит основной вклад в формирование спектра плазмоида.

В момент воздействия, соответствующий максимуму лазерного импульса (~200 нс), при наличии горячих электронов преобладают процессы ионизации, диссоциации и возбуждения молекул, атомов и ионов. На стадии адиабатического расширения облака, пока температура электронов еще достаточно высока, ионизация и диссоциация молекул продолжают. При этом с ростом концентрации электронов усиливаются процессы электронного тушения и обмена возбуждением между различными мультиплетами. В результате в спектре свечения молекул присутствует широкий набор колебательных переходов, а в спектре ионов азота N II имеют место различные электронные состояния и мультиплеты со спинами 2, 1 и 0.

Табл.1. Электронные переходы атомов для спектра излучения, приведенного на рис.5.

Излучатель	Длина волны (нм)	Переход	Мультиплетность	Интенсивность
N II	404.9	2p3d–2p4f	<sup>3</sup> F <sup>0</sup> – <sup>3</sup> G	Очень сильная
	423.9		<sup>3</sup> D <sup>0</sup> – <sup>3</sup> F	Сильная
	654.4	2p3d–2p4p	<sup>3</sup> D <sup>0</sup> – <sup>3</sup> D	Слабая
	332.8 (2)		<sup>3</sup> D– <sup>3</sup> P <sup>0</sup>	Сильная
	384.2 (3)	2p3p–2p4s	<sup>3</sup> P– <sup>3</sup> P <sup>0</sup>	Сильная
	391.9 (4)		<sup>1</sup> P– <sup>1</sup> P <sup>0</sup>	Слабая
	444.7	2p3p–2p3d	<sup>1</sup> P– <sup>1</sup> D <sup>0</sup>	Сильная
	593.8		<sup>3</sup> P– <sup>3</sup> D <sup>0</sup>	Очень сильная
	343.7	2p3s–2p3p	<sup>1</sup> P <sup>0</sup> – <sup>1</sup> S	Сильная
	399.5		<sup>1</sup> P– <sup>1</sup> D	Очень сильная
	463.0		<sup>3</sup> P– <sup>3</sup> S	Очень сильная
	567.6		<sup>3</sup> P <sup>0</sup> – <sup>3</sup> D	Очень сильная
			<sup>3</sup> D– <sup>3</sup> F	
		2p3p–2p3d	<sup>3</sup> P– <sup>3</sup> P <sup>0</sup>	
	N I	499–502	2p3s–2p3p	<sup>5</sup> P– <sup>5</sup> P <sup>0</sup>
		<sup>3</sup> P <sup>0</sup> – <sup>3</sup> S		
		2s2p <sup>2</sup> 3s–2s2p <sup>2</sup> 3p	<sup>5</sup> P– <sup>5</sup> P <sup>0</sup>	
		2s <sup>2</sup> 2p3p–2s <sup>2</sup> 2p3d	<sup>3</sup> S– <sup>3</sup> P <sup>0</sup>	
517.3 (5)		2s2p <sup>2</sup> 3p–2s2p <sup>2</sup> 3p	<sup>5</sup> D <sup>0</sup> – <sup>5</sup> F	Сильная
O II	517.6 (5)	2p <sup>2</sup> 3p–2p <sup>2</sup> 3d	<sup>2</sup> P <sup>0</sup> – <sup>2</sup> P	Сильная
	715.6	2p <sup>3</sup> 3s–2p <sup>3</sup> 3p	<sup>1</sup> D <sup>0</sup> – <sup>1</sup> D	Слабая
	777.3		<sup>5</sup> S– <sup>5</sup> P	Очень сильная
	794		<sup>3</sup> D <sup>0</sup> – <sup>3</sup> F	Слабая
	844.6		<sup>3</sup> S– <sup>3</sup> D	Слабая
	926.3		<sup>5</sup> P– <sup>5</sup> D <sup>0</sup>	Слабая
O I		2p <sup>3</sup> 3p–2p <sup>3</sup> 3d		

Табл.2. Электронные переходы атомов для спектра излучения, приведенного на рис.6,б.

Излучатель	Длина волны (нм)	Переход	Мультиплетность	Интенсивность
NI	664.4	2p <sup>3</sup> p-2p5s	<sup>4</sup> D <sup>0</sup> - <sup>4</sup> P	Слабая
	742.3-746		<sup>4</sup> P- <sup>4</sup> S <sup>0</sup>	Очень сильная
	821.1	2p <sup>2</sup> 3s-2p <sup>2</sup> 3p	<sup>4</sup> P- <sup>4</sup> P <sup>0</sup>	Очень сильная
	869.1		<sup>4</sup> P- <sup>4</sup> D <sup>0</sup>	Очень сильная
OI	615.5	2p <sup>3</sup> 3p-2p <sup>3</sup> 4d	<sup>5</sup> P- <sup>5</sup> D <sup>0</sup>	Слабая
	715.5		<sup>1</sup> D <sup>0</sup> - <sup>1</sup> D	Слабая
	777.3	2p <sup>3</sup> 3s-2p <sup>3</sup> 3p	<sup>5</sup> S- <sup>5</sup> P	Очень сильная
	844.6		<sup>3</sup> S- <sup>3</sup> D	Сильная
NII	499.4	2s2p <sup>2</sup> 3s-2s2p <sup>2</sup> 3p	<sup>5</sup> P- <sup>5</sup> P <sup>0</sup>	Слабая
		2s <sup>2</sup> 2p3p-2s <sup>2</sup> 2p3d	<sup>3</sup> S- <sup>3</sup> P <sup>0</sup>	Слабая
	567.3	2p3s-2p3p	<sup>3</sup> P <sup>0</sup> - <sup>3</sup> D	Слабая
	615.5	2p3d-2p4p	<sup>3</sup> F <sup>3</sup> - <sup>3</sup> D <sup>0</sup>	Слабая
	648.2	2p3s-2p3p	<sup>1</sup> P <sup>0</sup> - <sup>1</sup> P	Слабая

Табл.3. Электронные переходы молекул для спектра излучения, приведенного на рис.5.

Излучатель	Длина волны (нм)	Переход	Колебательное состояние	Интенсивность
N <sub>2</sub> <sup>+</sup> (Janin-d'Incan)	245.5	D <sup>2</sup> Π <sub>g</sub> -A <sup>2</sup> Π <sub>u</sub>	(2.2)	Очень слабая
	251.6		(3.3)	Очень слабая
	344.7		(23.16)	Слабая
N <sub>2</sub> <sup>+</sup> (первая отрицательная система)	383.5 (3)	B <sup>2</sup> B <sub>2</sub> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> -X <sup>2</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup>	(3.3)	Сильная
	385.7 (1)		(2.2)	Сильная
	391.4 (4)		(0.0)	Слабая
	297.6		(2.0)	Очень слабая
N <sub>2</sub> (вторая положительная система)	313.6	C <sup>3</sup> Π <sub>u</sub> -B <sup>3</sup> Π <sub>g</sub>	(2.1)	Очень слабая
	326.8		(4.4)	Слабая
	333.8 (2)		(1.1)	Сильная
	385.7 (1)		(4.7)	Сильная
	394.3		(2.5)	Слабая
	399.8		(1.4)	Очень сильная
	409.4		(4.8)	Сильная
	646.8		B <sup>3</sup> Π <sub>g</sub> -A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	(8.5)

Для более детального анализа элементарных физических процессов в плазмоиде и кавернах в табл.1-3 представлены характеристики электронных состояний молекул, атомов и ионов, соответствующие наблюдаемому линейчатому спектру.

Необходимо отметить, что практически каждому мультиплету соответствует несколько линий, длины волн которых могут различаться менее чем на 1 нм, т.е. они не разрешаются спектрометром. В этом случае в табл.1-3 указывалась длина волны перехода, наиболее близкого (с точностью 0.5 нм) к спектральному положению максимума интенсивности полосы, соответствующей свечению данного мультиплета. Кроме того, в пределах разрешающей способности прибора наблюдалось наложение возможных излучений различных мультиплетов и даже различных электронных состояний. Типичным примером такой ситуации является сильное излучение иона NII с длиной волны ~500 нм и шириной полосы до 3 нм (см. табл.1). Схожие ситуации отмечены одинаковыми цифра-

ми от 1 до 5 в табл.1,3. Недостаточное разрешение, в частности, не позволяет сделать однозначный вывод о наличии излучения иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> (первая отрицательная система), для которого все наблюдаемые линии накладываются на линии излучения иона NII и молекулы N<sub>2</sub> (вторая положительная система). Указанные факторы необходимо учитывать при анализе спектров.

Отметим, что спектр плазмоида оказался близким к спектру свечения сильноточного разряда, представленному на рис.2 работы [17]. Кроме дискретных линий и полос наблюдается сплошной спектр излучения в диапазоне 200-900 нм с максимумом в области длин волн ~500 нм. Положение максимума свечения этой полосы, оцененное в приближении свечения абсолютно черного тела и с учетом спектральной чувствительности прибора, соответствует излучению с температурой ~5800 К, что близко к результатам работы [17].

При анализе спектров плазмоида можно выделить процессы каскадного движения электронов с верхних уровней с квантовым числом 4 (4s, 4p, 4f) вниз с излучением очень сильных линий, например 4f → 3d (<sup>3</sup>F<sup>0</sup>-<sup>3</sup>G), 3d → 3p (<sup>3</sup>P-<sup>3</sup>D, <sup>3</sup>D-<sup>3</sup>F, <sup>3</sup>P-<sup>3</sup>P<sup>0</sup>), 3p → 3s (<sup>1</sup>P<sup>0</sup>-<sup>1</sup>S, <sup>1</sup>P-<sup>1</sup>D, <sup>3</sup>P-<sup>3</sup>S, <sup>3</sup>P<sup>0</sup>-<sup>3</sup>D). Видно, что в данном каскаде преобладают переходы с сохранением спина S = 1. В процессах возбуждения уровней атомов NI и OI можно предположить участие как электронного возбуждения, так и диссоциативной рекомбинации, условия для которой могут реализовываться на границе каверны при контакте плазмоида с холодным окружающим воздухом и остывшей плазмой.

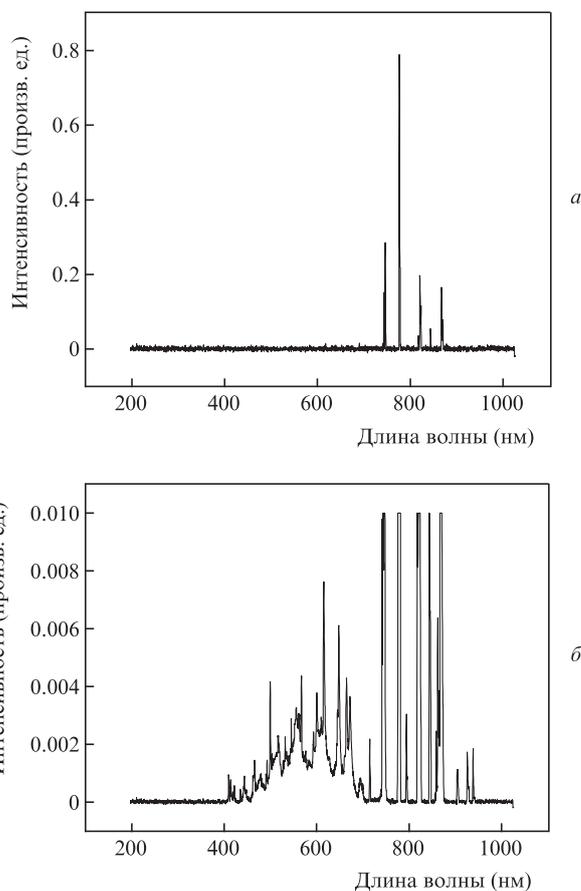


Рис.6. Спектры излучения каверн в тепловом следе на расстоянии 24 мм от центра формирования плазмоида при низкой (а) и высокой (б) чувствительности измерительной аппаратуры.

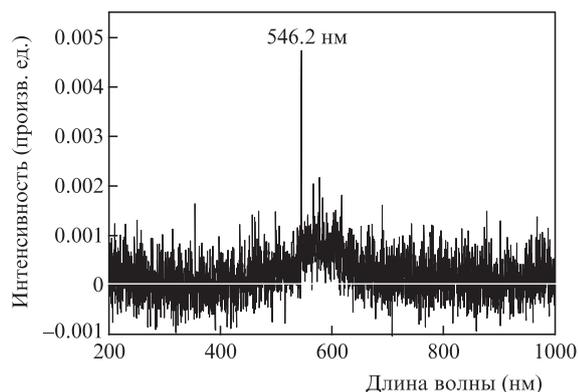
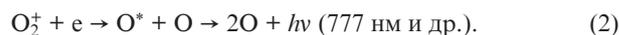
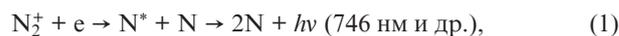


Рис.7. Спектр излучения каверны в тепловом следе на расстоянии 50 мм от центра формирования плазмоида.

На рис.6 и 7 приведены спектры излучения каверн в тепловом следе на расстояниях 24 и 50 мм. При скорости потока 500 м/с время появления каверн на этих расстояниях составляло 50 и 100 мкс соответственно. На рис.6 показаны спектры излучения при разной чувствительности системы регистрации (различие в 50–100 раз). Из приведенных на рис.5–7 спектров видно, что с течением времени спектры свечения каверны существенно меняются и значительно отличаются от спектров свечения плазмоида. При низкой чувствительности (рис.6,а) в свечении каверны через 50 мкс наблюдаются только пять относительно сильных линий в ИК области 700–900 нм. При существенном увеличении чувствительности удалось зарегистрировать сплошной спектр в области 400–600 нм и несколько слабых линий, однако сильные линии при этом находятся в насыщении. Низкая чувствительность связана с тем, что в момент измерения каверна пролетала мимо точки измерения на некотором расстоянии, где интенсивность регистрируемого излучения была малой. На расстоянии 50 мм (через 100 мкс с момента формирования каверны) при максимально возможной в наших экспериментах чувствительности измерительной системы удалось зарегистрировать свечение каверны в виде сплошного спектра и одной линии (рис.7).

Из приведенных в табл.3 данных видно, что в плазмоиде присутствует сильное излучение молекулы  $N_2$  (вторая положительная система,  $S^3P_u - V^3P_g$ ). В каверне (табл.2) это излучение не зарегистрировано. Большой интерес представляет свечение иона N II, излучение которого сосредоточено в интервале 322–567 нм. В каверне на расстоянии 25 мм (через 50 мкс) излучение иона N II очень слабое и сосредоточено в интервале 500–648 нм (табл.2).

Особо следует отметить специфику свечения атомов NI и OI. В плазмоиде можно выделить только две очень сильные линии NI и OI на длинах волн 744.2 и 777.3 нм соответственно. В каверне через 50 мкс (25 мм) сохраняется сильное свечение этих линий и появляются еще три линии, т.е. наблюдается свечение пяти сравнительно близких по интенсивности линий (см. рис.6,а): атома NI (744.2, 821.1 и 869.1 нм) для одной электронной конфигурации  $2p^23s - 2p^23p$  (мультиплеты  $^4P - ^4S^0$ ,  $^4P - ^4P^0$ ,  $^4P - ^4D^0$ ) и атома OI (777.3 и 844.6 нм) для электронной конфигурации  $2p^33s - 2p^33p$  (мультиплеты  $^5S - ^5P$ ,  $^3S - ^3D$ ). Согласно [17] в формировании ИК спектра атомов NI и OI могут принимать участие холодные электроны, обеспечивая диссоциативную рекомбинацию плазмы в следующих основных процессах:



В каверне в течение времени вплоть до 50 мкс наблюдается слабое свечение некоторых линий ионов азота, которое, по-видимому, связано с рекомбинационными процессами. Формирование спектра желто-зеленой полосы 450–750 нм (см. рис.6 и 7) может быть обусловлено [17] химической реакцией с образованием молекулы двуокиси азота в распадающейся каверне на поздней стадии ее развития на расстояниях 25–50 мм (времена 50–100 мкс) от места формирования плазмоида:



#### 4. Заключение

В настоящей работе впервые экспериментально исследовано изменение во времени (до 100 мкс) спектра излучения ОПР в сверхзвуковом потоке воздуха. При анализе спектра плазмоида, т.е. начальной стадии ОПР, зарегистрированы как сплошной спектр излучения в области 200–900 нм, так и широкий набор линий нейтральных и ионизованных молекул и атомов кислорода и азота. При этом отмечено наличие линий иона N II, обусловленных каскадным процессом высвечивания преимущественно с сохранением спина при переходе электрона с верхних оболочек, например  $4f \rightarrow 3s$ .

Показано существенное изменение спектра при переходе от адиабатического расширения, характеризуемого очень интенсивным свечением, к изобарическому. Установлено, что даже через 50 мкс после образования каверны на расстояниях вплоть до 25 мм вниз по потоку в спектре ее свечения, наряду с сильными линиями атомов NI и OI, обусловленными, по-видимому, диссоциативной рекомбинацией ионов  $N_2^+$  и  $O_2^+$ , наблюдаются слабые линии иона N II. Обнаружено, что свечение теплового следа на больших расстояниях вызвано свечением каверн в области желто-зеленой полосы 450–750 нм на изобарической стадии их эволюции (вплоть до 100 мкс и расстояния 50 мм вниз по потоку), которое может определяться хемилюминесценцией при взаимодействии молекул NO с атомами O и образованием возбужденных молекул  $NO_2$ .

1. Ellinwood J.W., Mirels H. *Appl. Opt.*, **14** (9), 2238 (1975).
2. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **351** (3), 339 (1996).
3. Ахманов С.А., Руденко О.В., Федорченко А.Т. *Письма в ЖТФ*, **5**, 934 (1979).
4. Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1980).
5. Борзов Ю.В., Михайлов В.М., Рыбка И.В., Савищенко Н.П., Юрьев А.С. *Инж.-физ. журн.*, **66**, 515 (1994).
6. Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. *Докл. РАН*, **336**, 466 (1994).
7. Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Смирнов А.Л., Демин В.Н., Окопруг А.В., Бакланов А.М., Онищук А.А. В кн.: *Наука и нанотехнологии* (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007, с. 123).
8. Тищенко В.Н., Грачев Г.Н., Павлов А.А., Смирнов А.Л., Павлов Ал.А., Голубев М.П. *Квантовая электроника*, **38**, 82 (2008).
9. Sperber D., Schmid F., Eckel H.A., Fasoulas S. *Proc. 6th AIAA Flow Control Conf.* (New Orleans, Louisiana, USA, 2012).
10. Sperber D., Eckel H.-A., Steimer S., Fasoulas S. *Contrib. Plasma Phys.*, **52** (7), 636 (2012).

11. Грачев Г.Н., Медведев А.Э., Пинаев П.А., Тищенко В.Н. *Труды V Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине»* (Новосибирск, 2013).
12. Малов А.Н., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **41**, 1027 (2011).
13. Малов А.Н., Оришич А.М. *Письма в ЖТФ*, **38**, 32 (2012).
14. Малов А.Н., Оришич А.М., Бобарыкина Т.А., Чиркашенко В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **25**, 244 (2012).
15. Малов А.Н., Оришич А.М. *Квантовая электроника*, **44**, 83 (2014).
16. Бобарыкина Т.А., Малов А.Н., Оришич А.М., Чиркашенко В.Ф., Яковлев В.И. *Квантовая электроника*, **44**, 836 (2014).
17. Прокопьев В.Е., Иванов Н.Г., Кривоносенко Д.А., Лосев В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **56**, 60 (2013).
18. Букин О.А., Ильин А.А., Кульчин Ю.Н., Нагорный И.Г., Павлов А.Н., Буланов А.В. *Квантовая электроника*, **36**, 553 (2006).
19. Samacho J.J., Poyato J.M.L., Díaz L., Santos M. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **40**, 4573 (2007).
20. Кабанов С.Н., Маслова Л.И., Терехова Т.А., Трухин В.А., Юров В.Т. *ЖТФ*, **60**, 37 (1990).
21. Wiese W.L., Smith M.W., Glennon B.M. *Atomic Transition Probabilities. Vol. 1. Elements Hydrogen through Neon* (Washington, 1966, p. 153).