

ВЕСТНИК

Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

№ 2



2023



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

УДК 533.9:537.52

Свечение ударно сжатого слоя при обтекании тела потоком плазмы струйного диафрагменного разряда

Е. В. Калашников, Н. И. Павлов, В. Г. Бородин, К. К. Коленчиков,
В. М. Комаров, В. А. Малинов, В. М. Мигель, В. С. Попиков, А. В. Чарухчев

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения»,
Сосновый Бор, Ленинградская область, Российская Федерация

Целью исследования является физическое моделирование и получение экспериментальных данных по свечению ударно сжатого слоя (УСС) и собственной атмосферы, характерных для высокоскоростных объектов, с использованием метода формирования высокоскоростного потока, обтекающего модельное тело, на основе струйного диафрагменного разряда. В работе описан многоканальный комплекс, созданный для диагностики УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы со скоростью в диапазоне от 4 до 50 км/с, в условиях пониженного атмосферного давления. Показано, что совокупность реализованных оптических и спектральных методов позволяет диагностировать обтекающее модельное тело потоком с регистрацией снимков структуры УСС вблизи носка модельного тела и спектров излучения УСС.

Ключевые слова: ударно сжатый слой, струйный диафрагменный разряд, эрозионная плазма

Для цитирования: Калашников Е. В., Павлов Н. И., Бородин В. Г., Коленчиков К. К., Комаров В. М., Малинов В. А., Мигель В. М., Попиков В. С., Чарухчев А. В. Свечение ударно сжатого слоя при обтекании тела потоком плазмы струйного диафрагменного разряда // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 53–65. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

For citation: Kalashnikov E. V., Pavlov N. I., Borodin V. G., Kolenchikov K. K., Komarov V. M., Malinov V. A., Migel V. M., Popikov V. S., Charukhchev A. V. Luminescence of the shock-compressed layer produced by a plasma flow around the body, using a jet diaphragm discharge // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 53–65. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

Поступила 14.04.2023 Отрецензирована 24.04.2023 Одобрена 30.04.2023 Опубликовано 14.06.2023

Введение

Известно, что сильное свечение, исходящее от объектов, летящих в разреженной атмосфере со скоростями 5 Махов и более, в значительной мере обусловлено особенностями обтекания корпуса набегающим потоком атмосферного газа [1, 2]. За фронтом ударной волны возникает высокотемпературный ударно сжатый слой (УСС), в котором кинетическая энергия молекул атмосферных газов преобразуется в их внутреннюю энергию

с протеканием процессов электронного возбуждения, распада на отдельные атомы (диссоциации) и ионизации. Происходящие процессы усложняются идущими химическими реакциями с участием продуктов абляции материалов корпуса. Ударная волна обтекает летящий объект, сжатый слой воздуха за ударной волной, сливаясь с пограничным слоем у поверхности объекта, образует ударно сжатый слой газа, который является источником мощного собственного свечения в диапазоне волн от ультрафиолета (УФ) до инфракрасной (ИК) области спектра. Интенсивное свечение наблюдается в отдельных линиях атомарных газов и в молекулярных полосах продуктов,



содержащихся в УСС и спутном следе, включая продукты абляции. Известной проблемой является адекватная оценка соотношения долей равновесного и неравновесного излучений, исходящих из УСС [3].


Существующие расчетные модели излучения в силу сложности учитываемых физических процессов требуют верификации, которая, в свою очередь, должна быть обеспечена необходимыми экспериментальными данными. Аэродинамические трубы и баллистические трассы достаточно дороги в эксплуатации, имеют ограничения по физическому моделированию и диагностике процессов обтекания тел в части моделируемых скоростей набегающего потока, внешнего атмосферного давления, количества каналов размещаемой диагностической аппаратуры и т.д. [1–5]. В этой связи актуальной является реализация нового метода экспериментального моделирования УСС с использованием струйного диафрагменного разряда (СДР) [6, 7]. Указанный метод позволяет получать УСС и структуру течений около модельного тела высокоскоростных (до нескольких десятков километров в секунду) потоков практически любого химического и ионизационного состава [8].


Ниже представлено краткое описание созданной лабораторной моделирующей установки на основе СДР с многоканальным комплексом диагностики УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы со скоростью в диапазоне от 4 до 50 км/с в условиях пониженного атмосферного давления до 10^{-2} Па. Показано, что комплекс диагностики позволяет регистрировать структуру набегающей на модельное тело струи с оценкой параметров потока: распределения скорости потока, температуры, статического и полного давления. Особое внимание уделено получению результатов экспериментальных исследований структуры УСС вблизи носовой части (носка) модельных тел и исходящего от УСС излучения, так называемой критической области обтекания модельных тел разной конфигурации. Показано, что согласно полученным спектрам основной вклад в излучение дают атомы


и ионы продуктов эрозии основного состава плазмообразующего материала диафрагмы СДР. Однако при этом также устойчиво регистрируются полосы таких атмосферных газов, вовлекаемых в набегающий на модельное тело поток, как молекулы азота (N_2), кислорода (O_2), монооксида азота (NO). Также показано, что обработка спектров с использованием данных о полуширинах и интенсивностях спектральных линий атомов и молекулярных полос позволяет оценить для выбранных излучающих участков УСС концентрацию электронов N_e , температуру T_e энергетического распределения электронов, а также вращательную, колебательную и поступательную температуры.

Метод физического моделирования УСС и лабораторная установка на основе СДР

На рисунке 1 представлена схема СДР, где изображена плазмообразующая диафрагма 1 с диаметром отверстия $2r_0$, кольцевой анод 2 с диаметром отверстия $2R$, кольцевой катод 3 с диаметром отверстия $2R$. На рисунке 1 также показано:

 – направление линий азимутально-магнитного поля H_ϕ собственного тока разряда;

 – направление истечения в анодной и катодной частях разрядного промежутка плазменных струй V ;

 – направление тока разряда I .

Скорость V_∞ плазменного потока в плоскости кольцевого электрода определяется из соотношения [6–8]

$$V_\infty = 0,5V_{кр} \left\{ [2/(\gamma - 1)] \left[1 - \left(\frac{P_{вак}}{P_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right\}^{1/2} + \mu_0 i^2 (4\pi\omega)^{-1} \ln(R/r_0), \quad (1)$$

где $V_{кр}$ – скорость потока в критическом сечении на срезе отверстия диафрагмы, м/с;

$P_0 = (1 + \gamma)P_{кр}$ – проталкивающее давление в центре отверстия диафрагмы, Па [6–8];

$P_{кр} = [0,14 i^{1,34} (2I_0)^{0,93}] / [r_0^{2,95} (1 + r_0/2I_0)^{0,67}]$ – давление в критическом сечении на срезе отверстия диафрагмы, Па [6–8];

$P_{вак}$ – давление в вакуумной камере, Па;

$\gamma = c_p/c_v \approx 1,2$ – постоянная адиабаты с учетом энергии ионизации плазмы;

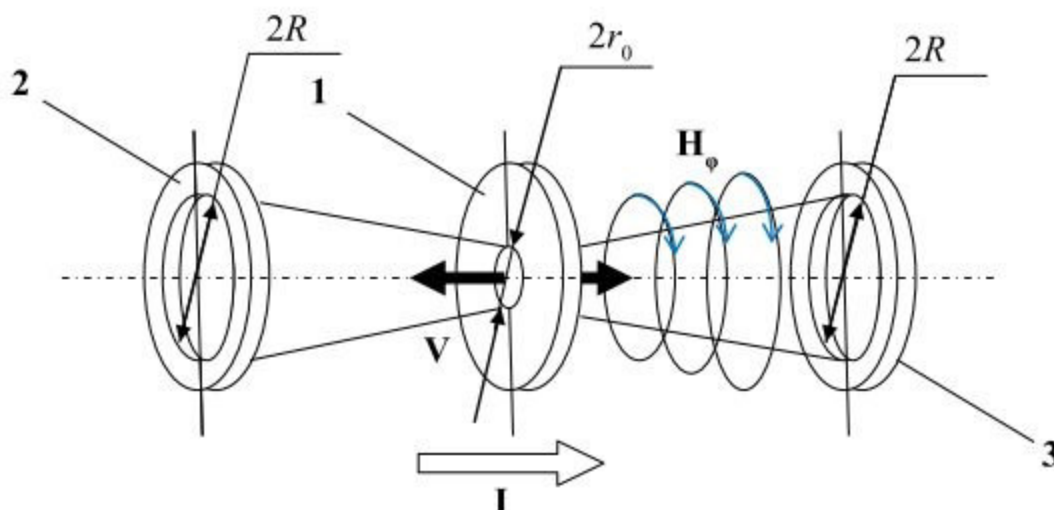


Рис. 1. Схема СДР: 1 – диафрагма; 2 и 3 – кольцевые электроды

ω – средняя скорость уноса массы плазмообразующего материала диафрагмы, кг/с;
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;
 i – сила тока разряда, А;
 r_0 – радиус отверстия в диафрагме, м;
 $2l_0$ – толщина диафрагмы, м;
 R – радиус отверстия в кольцевом электроде, м.

При этом компонентный состав потока плазмы соответствует выбранному составу плазмообразующего материала внутренней стенки расходного сопла в отверстии диафрагмы и определяется составом химических элементов и стехиометрическими коэффициентами его исходной формулы. В опорном режиме используются плазмообразующие диафрагмы из текстолита марки ПТК со стехиометрическими коэффициентами состава $(C_{37}H_{47}O_{16})_n$ с размерами отверстия $2r_0 = 4,0$ мм и $2l_0 = 4,0$ мм.

Для исследования свечения УСС при обтекании тела набегающим потоком эрозионной плазмы СДР и возможности использования полученных данных исследования для наблюдения высокоскоростных объектов в атмосфере создана лабораторная установка с многоканальным диагностическим комплексом и рассмотрены свойства высокоскоростной струи за кольцевым электродом (рис. 2а, б).

Структура истекающей струи за кольцевым электродом, имеющим вид цилиндрического (или конического) сопла в сторону объема камеры с модельным телом, соответ-

ствует начальному участку истечения с недорасширением в затопленное пространство («первая бочка Маха») [9] с расчетными параметрами: распределениями в меридиональном сечении и по оси струи скорости потока V_∞ , температуры T_∞ , статического давления P_∞ , числа Маха M_∞ , числа Рейнольдса Re_∞ , числа Кнудсена Kn_∞ . На рисунке 2а справа показаны сечения потока докатодной струи на разрядном промежутке диафрагма–катод: «0–0» – срединное сечение (центр отверстия в диафрагме); «1–1» – срез отверстия в диафрагме; «2–2» – устье струи; «3–3» – срединное сечение струи; «4–4» – прикатодное сечение струи; «5–5» – срез кольцевого катода на входе; а также характерные зоны: I – устьевая зона струи; II – осевая зона струи; III – приосевая зона струи; IV – оболочка струи. Рисунок 2б справа иллюстрирует состав лабораторной моделирующей установки с размещением носка модельного тела в главной точке вакуумной камеры: 1 – вакуумная камера испытаний; 2 – источник плазмы СДР; 3 – вакуумная система откачки; 4 – имитатор солнечного коротковолнового излучения; 5 – вакуумметр; 6 – модельное тело; 7 – держатель модельного тела. Слева в укрупненном масштабе отображены модельное тело, где носок модельного тела размещен в главной точке камеры (ГТК), и истекающая струя.

При размещении вершины модельного тела (носка) в главной точке камеры испытаний, находящейся в области потока

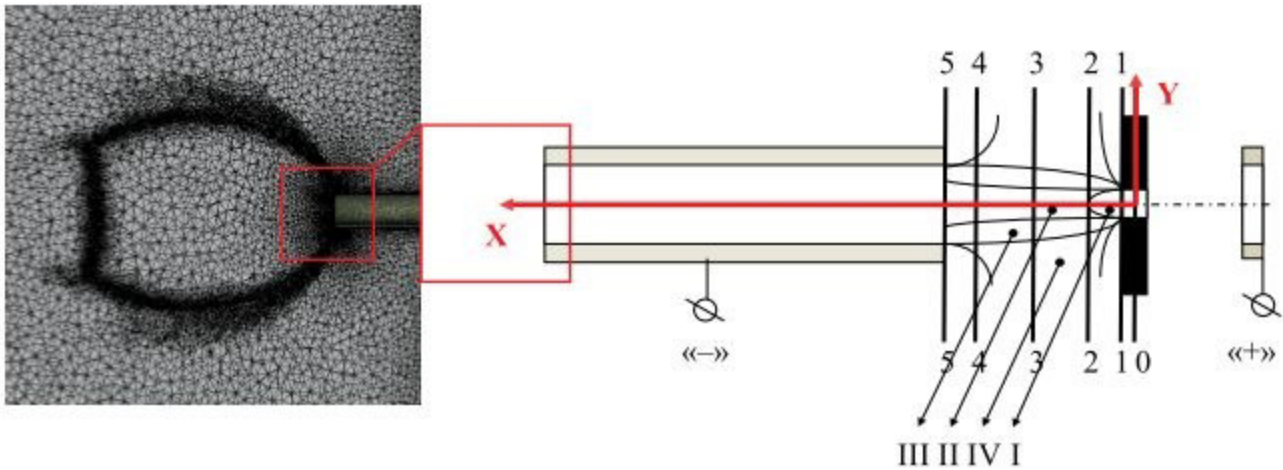


Рис. 2а. Характерные сечения и зоны потока докатодной струи и истекающей из катода

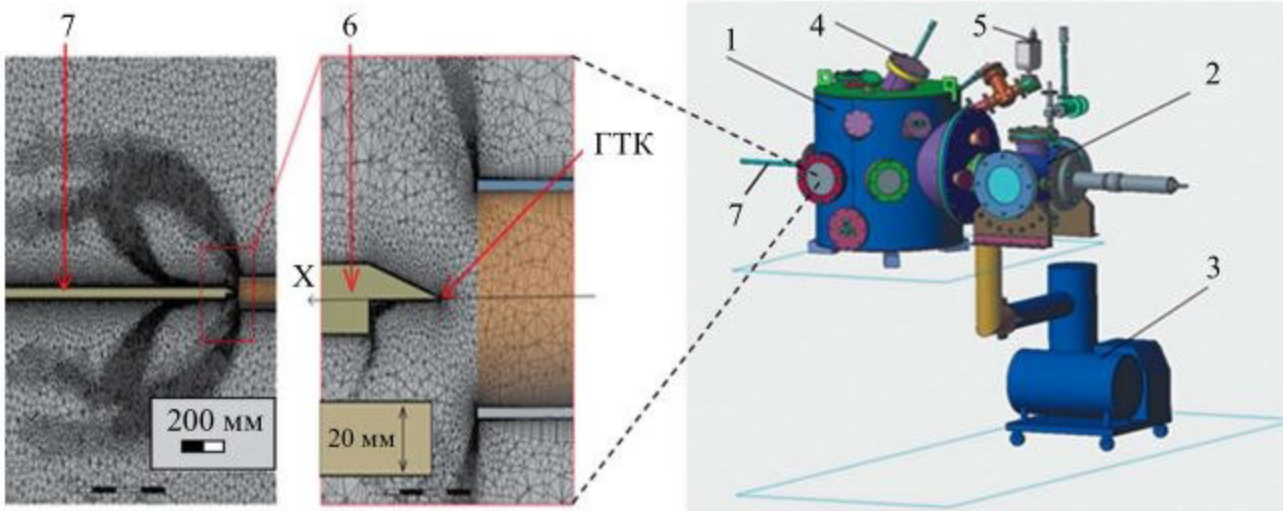


Рис. 2б. Лабораторная моделирующая установка с размещением носка модельного тела в главной точке камеры (ГТК) испытаний

с расчетными параметрами набегающего потока, исследуемая область УСС регистрировалась оптическими методами по величине отхода ударной волны и спектральными методами по свечению различных зон УСС (рис. 3–11). Число Маха M_∞ для аттестуемого высокоскоростного потока за кольцевым электродом определялось экспериментальным путем регистрацией на интерферограммах угла θ_c присоединенного скачка уплотнения (ударной волны) при обтекании модельного тела в виде одностороннего клина с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$ под углом атаки, равном $\alpha = 0^\circ$, с использованием известной зависимости [10]:

$$M_\infty = \{(\sin \theta_c)^2 - 0.5(\gamma + 1)[\sin \theta_c \cdot \sin \beta_{кл} / \cos(\theta_c - \beta_{кл})]\}^{-1/2}. \quad (2)$$

Местная скорость звука (в среде) A_∞ определялась по формуле:

$$A_\infty = (\frac{\gamma P_\infty}{\rho_\infty})^{1/2} = [\Delta h_\infty (\gamma - 1)]^{1/2}, \quad (3)$$

где ρ_∞ – плотность в потоке, кг/м³;

P_∞ – давление в потоке, Па;

Δh_∞ – удельная энтальпия в потоке, Дж/кг.

Соответственно, скорость потока V_∞ за кольцевым электродом равна

$$V_\infty \approx A_\infty \cdot M_\infty. \quad (4)$$

Параметры режима электропитания и параметры СДР при проведении экспериментов включали: напряжение емкостного накопителя энергии $U_0 = 5,0$ кВ, амплитуда импульса тока $i_{\max} = 50$ кА, общая длительность импульса тока 400 мкс. Регистрация наблюдаемой области УСС осуществлялась высокоскоростной цифровой камерой с частотой $f = 77\,000\text{--}125\,000$ кадр/с и длительностью экспозиции $t_{\text{экс}} = 1$ мкс; для кадров, приведенных на рисунках 3

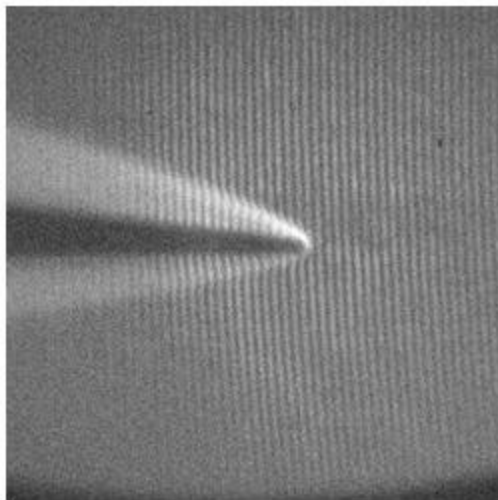


и 4, момент регистрации кадра соответствовал $t_p \approx 80$ мкс от начала токовой фазы разряда.

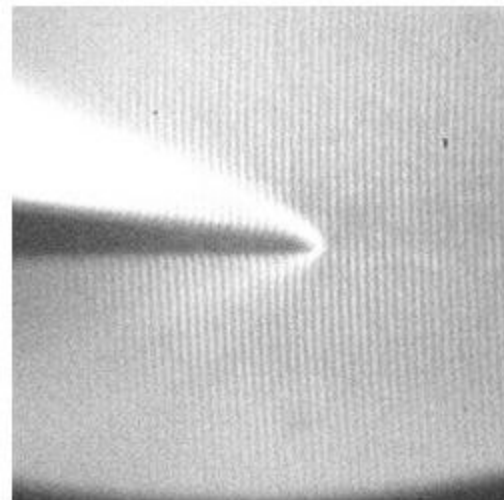
На рисунках 3 и 4 представлены снимки структуры УСС вблизи модельных тел в виде клина с углом $\beta_{кл} = 8^\circ$ (при кадровой частоте $f = 77\,000$ кадр/с) и конуса с углом при вершине $2\theta_{кон} = 90^\circ$ (при кадровой частоте $f = 125\,000$ кадр/с). Снимки иллюстрируют структуру УСС, характерную для критической области торможения набегающего потока, включающую ударную волну (УВ), зону между УВ и пограничным слоем, прилегающим к поверхности тела, и сам пограничный слой. При этом показательно уменьшение интенсивности ударной волны, размера и свечения критической области (области торможения,

совпадающей с главной точкой камеры испытаний) и области течения за вершиной модельного тела при понижении давления в окружающей среде с $p_{вак} = 290$ Па (рис. 3б и 4б) до $p_{вак} = 4 \times 10^{-2}$ Па (рис. 3а и 4а).

На рисунке 5а приведена осциллограмма импульса излучения в УФ области спектра ($\Delta\lambda = 240\text{--}320$ нм) для области УСС в критической области торможения потока эрозивной плазмы для модельного тела в форме клина, $\beta_{кл} = 8^\circ$, полученная на фотоэлектрическом канале на основе фотоприемного устройства с TeCs фотокатодом. В результате обработки сигнала получено значение спектральной плотности яркости в критической области размером ~ 12 мм, $L_{макс} \approx 16 \pm 2$ мВт/(см²ср·мм).

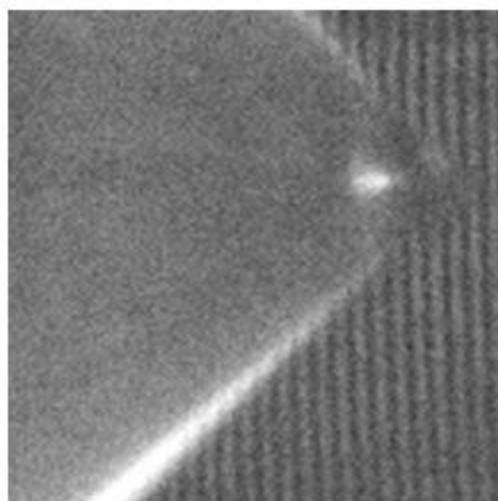


а

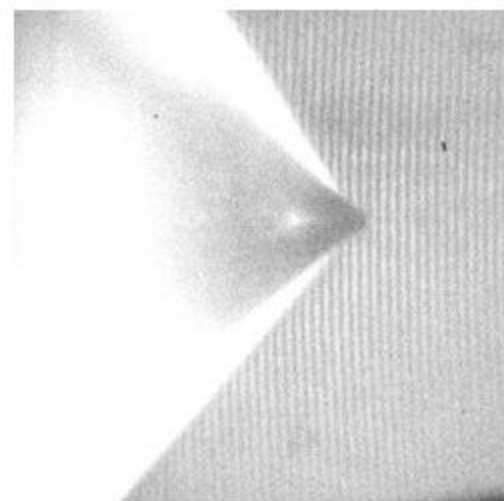


б

Рис. 3. Интерферограмма УСС при обтекании клина с $\beta_{кл} = 8^\circ$ высокоскоростным потоком плазмы за кольцевым катодом СДР



а



б

Рис. 4. Интерферограмма УСС при обтекании конуса с углом при вершине $2\theta_{кон} = 90^\circ$ высокоскоростным потоком плазмы за кольцевым катодом СДР

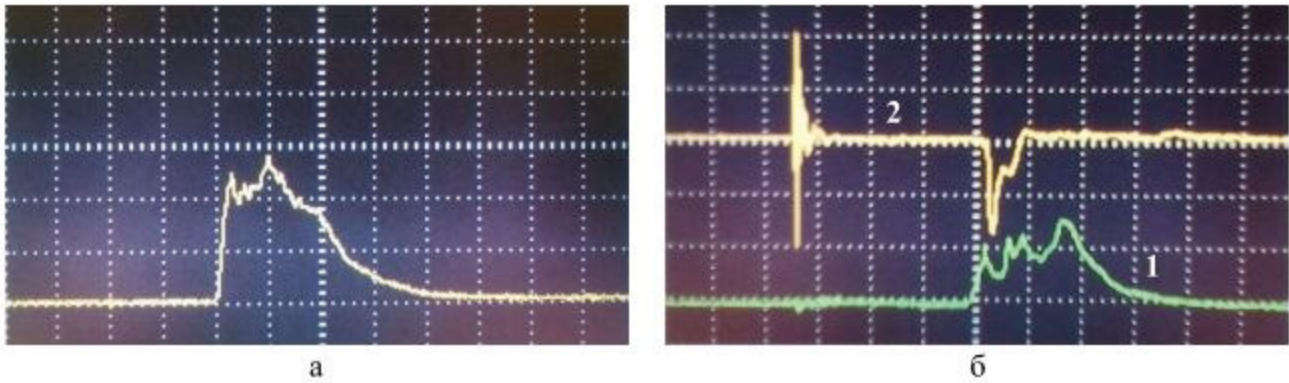


Рис. 5. Осциллограмма импульса излучения в диапазоне волн $\Delta\lambda = 240\text{--}320$ нм (а); осциллограмма 1 импульса излучения в диапазоне $\Delta\lambda = 250\text{--}260$ нм и осциллограмма 2 импульса давления (б); модельное тело в форме клина, $\beta_{\text{кл}} = 8^\circ$.

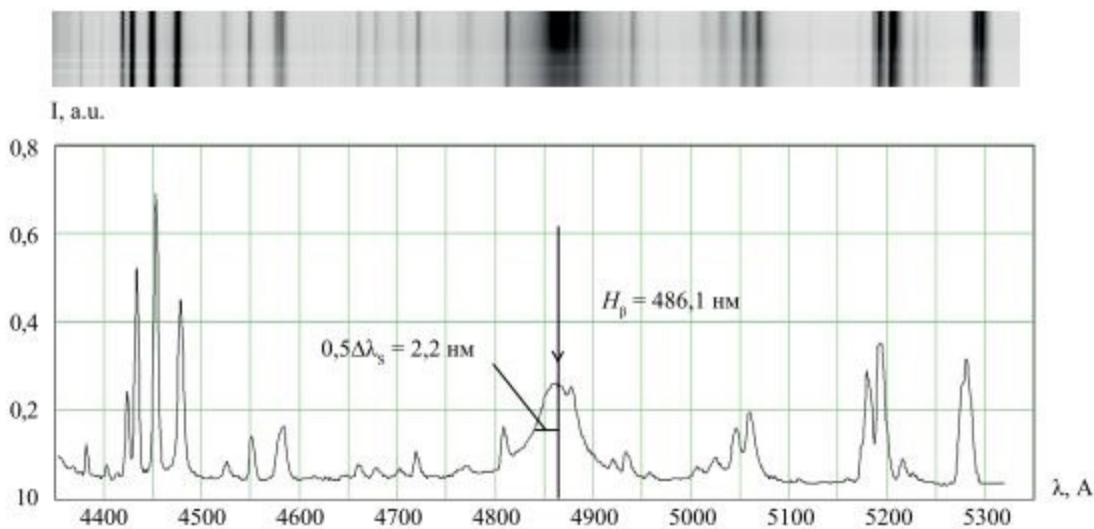


Рис. 6. Спектр излучения УСС в критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин, $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$)

На рисунке 5б приведена осциллограмма 1 импульса излучения в более узком спектральном интервале волн $\Delta\lambda = 250\text{--}260$ нм с полученной оценкой значения спектральной плотности яркости $L_{\text{max}\lambda} \approx 5 \pm 2$ мВт/см²ср·нм.

Для определения значения статического давления в набегающем высокоскоростном потоке при обтекании модельного тела использовался пьезоэлектрический датчик, размещенный перпендикулярно оси на расстоянии 10 мм от оси потока и расстоянии 20 мм от среза конического сопла (катода). Для указанного выше режима электропитания СДР измеренное абсолютное значение статического давления не превышает $P_{\text{стат, макс}} \approx 2,7 \cdot 10^5$ Па, осциллограмма 2 импульса давления приведена на рисунке 5б сверху.

Для измерения значения полного давления скорости потока $P_{\text{полн, эксп}}$ использовался

также пьезоэлектрический датчик, но размещенный вдоль оси потока в ГТК. При этом измеренное максимальное абсолютное значение составило $P_{\text{полн, эксп}} \approx 28 \cdot 10^5$ Па.

Измерение спектров излучения УСС

Для получения спектров излучения высокоскоростного потока в видимом диапазоне ($\Delta\lambda = 400\text{--}800$ нм) использовался диагностический канал, собранный на основе дифракционного спектрометра с цифровой камерой. На рисунке 6 показан характерный вид спектра излучения УСС в критической области торможения потока эрозионной плазмы вблизи носка модельного тела – одностороннего клина $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$; $p_{\text{вак}} = 290$ Па.

Спектры, полученные в видимом диапазоне, позволяют, используя метод на основе эффекта уширения Штарка спектральной



линии и зависимость полуширины спектральных линий H_β атома водорода от концентрации электронов N_e (см^{-3}) при различных температурах плазмы [11], определить текущее значение и распределение концентрации электронов N_e в различных зонах потока и УСС. По данным спектра на рисунке 6 величина полуширины спектральной линии атома водорода H_β ($\lambda = 486,1$ нм) составила $0,5\Delta\lambda_s = 2,2$ нм, а концентрация электронов N_e в критической области торможения потока равна $N_e \approx 7,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Одновременно с регистрацией газодинамической структуры при моделировании обтекания потоком плазмы СДР модельных тел использовался диагностический канал, где регистрировалось излучение потока и УСС с помощью спектрометра в УФ диапазоне спектра (200–400 нм) со спектральным разрешением до 0,2 нм и временем экспозиции от 100 мкс до 10 мс.

На рисунке 7 показан спектр излучения на оси потока эрозионной плазмы на срезе конического сопла кольцевого катода в относительных единицах, полученный на канале УФ спектрометра, $p_{\text{вак}} = 290$ Па.

Данные, полученные после первичной обработки спектра, использовались для определения температуры T_e энергетического распределения электронов по отношению интенсивностей спектральных линий ионов CaII ($\lambda = 396,8$ нм и $\lambda = 317,9$ нм), а также для определения вращательной температуры $T_{\text{вр}}$ фиолетовой системы полос радикала CN ($\text{B}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Sigma^+$) по крутизне спада интенсивности в отклонении полос CN 388,3 нм, 387,2 нм и значения

колебательной температуры $T_{\text{кол}}$ по отношению интенсивностей в кантах этих же спектральных полос CN 388,3 нм (0–0) и 387,2 нм (1–1). Найденные температуры в потоке на выходе из катодного сопла показали близость их значений $T_{\text{кол}} \approx T_{\text{вр}} \approx T_{\text{газ}} \approx 8,4$ кК в пределах погрешности измерений, что может служить обоснованием наличия состояния локального термодинамического равновесия (ЛТР).

На рисунке 8 показан спектр излучения УСС из главной точки камеры (ГТК) – критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$, $p_{\text{вак}} = 290$ Па). Используя метод относительных интенсивностей для группы спектральных линий (линий ионов кальция CaII 315,88 нм, CaII 317,9 нм, CaII 393,36 нм и CaII 396,8 нм), были определены значения температуры распределения электронов по наклону прямой, уравнение которой связывает температуру электронов, параметры атомных переходов для выбранных спектральных линий [12, 13] и которые составили в среднем $T_e \approx 9,1$ кК. Этот результат свидетельствует в пользу наличия в области торможения потока эрозионной плазмы условий, характерных для локального термодинамического равновесия (ЛТР). Наличие в критической области торможения потока состояния ЛТР отмечается и в других работах [3, 14–16], где было показано, что на температуру в критической точке неравновесные процессы оказывают очень слабое влияние.

На рисунке 9 показан спектр излучения УСС из области вблизи оси потока с линейным

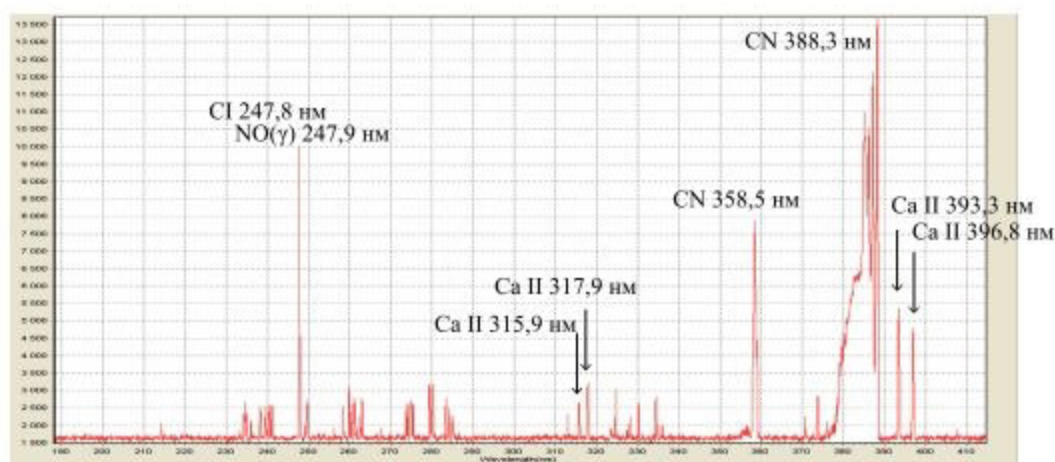


Рис. 7. Спектр излучения области потока эрозионной плазмы на срезе конического сопла кольцевого катода

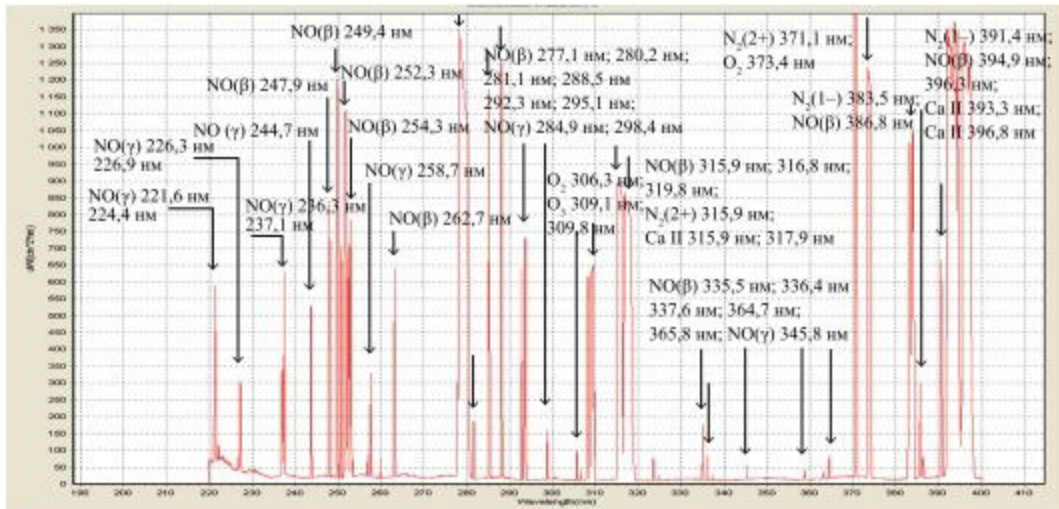


Рис. 8. Спектр излучения УСС критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$)

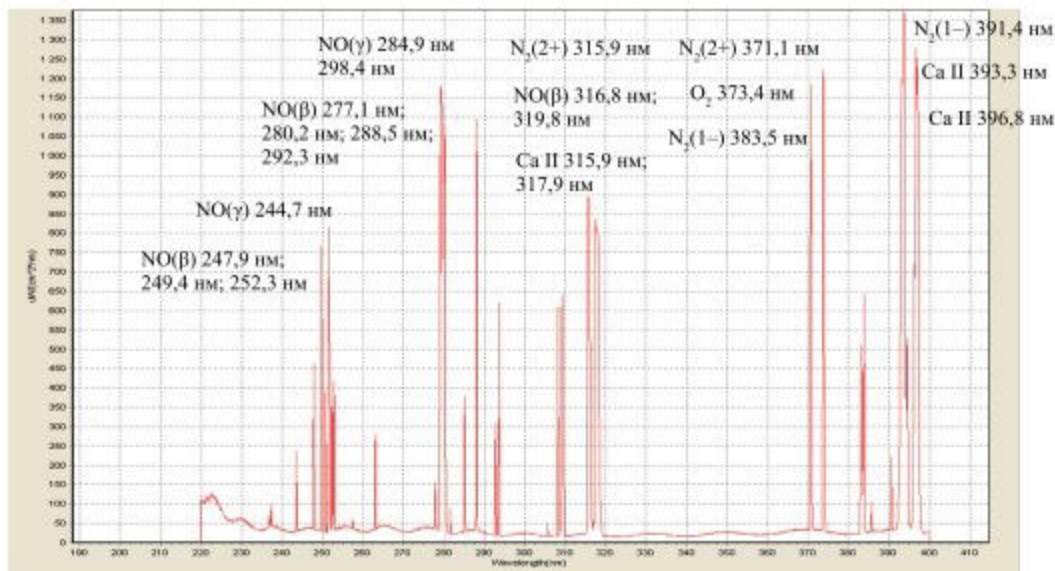


Рис. 9. Спектр излучения УСС из области на оси за носком модельного тела ($x = -20$ мм от ГТК, односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$)

размером около 4,2 мм и находящейся за носком модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$, $p_{\text{вак}} = 290$ Па) на расстоянии 20 мм от главной точки камеры (ГТК).

Для изменения компонентного состава УСС были использованы специально синтезированные плазмообразующие материалы диафрагмы. Кроме текстолита марки ПТК с химическим составом $(C_{37}H_{47}O_{16})_n$ использовались материалы на основе нитрида бора, сополимера дифенелол-пропана с эпихлоргидрином, полиоксипропиленамина, бутандиола.

На рисунке 10 для сравнения показаны спектры излучения УСС в УФ области с использованием в качестве плазмообразующего материала образцов на основе текстолита

марки ПТК (а) и нитрида бора (б). Спектры излучения получены при пониженном давлении в камере $p_{\text{вак}} = 3,1 \times 10^{-2}$ Па, относятся к критической области торможения потока эрозионной плазмы из зоны размером около 4,2 мм для модельного тела в виде одностороннего клина с $\beta_{кл} = 15^\circ$ и оцифрованы в величинах спектральной плотности яркости.

На рисунке 11 показан спектр излучения УСС в условиях повышенного давления в камере ($p_{\text{вак}} = 290$ Па) в критической области торможения потока эрозионной плазмы модельного тела (односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$) с использованием плазмообразующего материала диафрагмы на основе нитрида бора. Максимальные значения спектральной

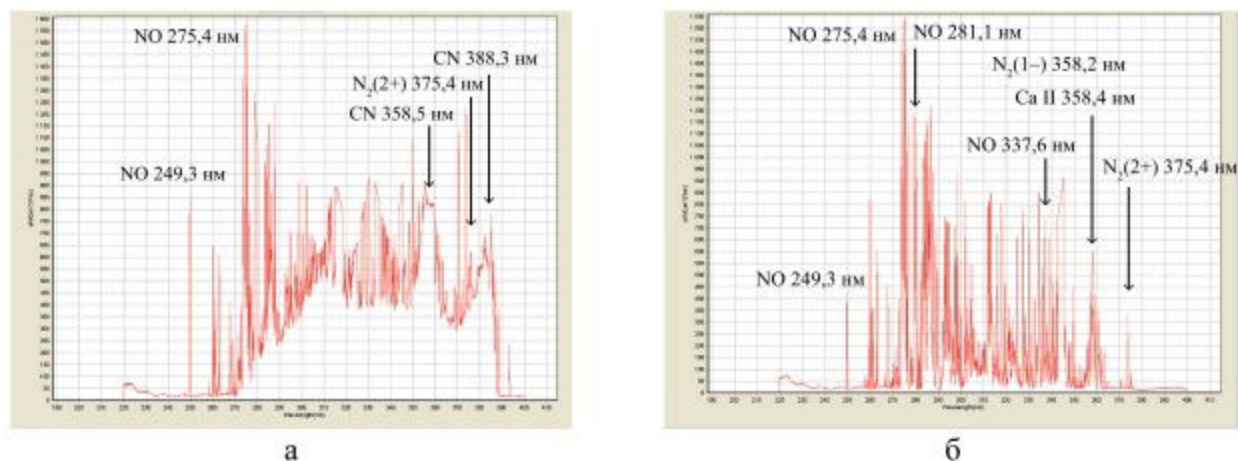


Рис. 10. Спектры излучения УСС в критической точке торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$); $p_{вжк} = 3,1 \times 10^{-2}$ Па; плазмообразующий материал диафрагмы – текстолит марки ПТК (а) и нитрид бора (б)

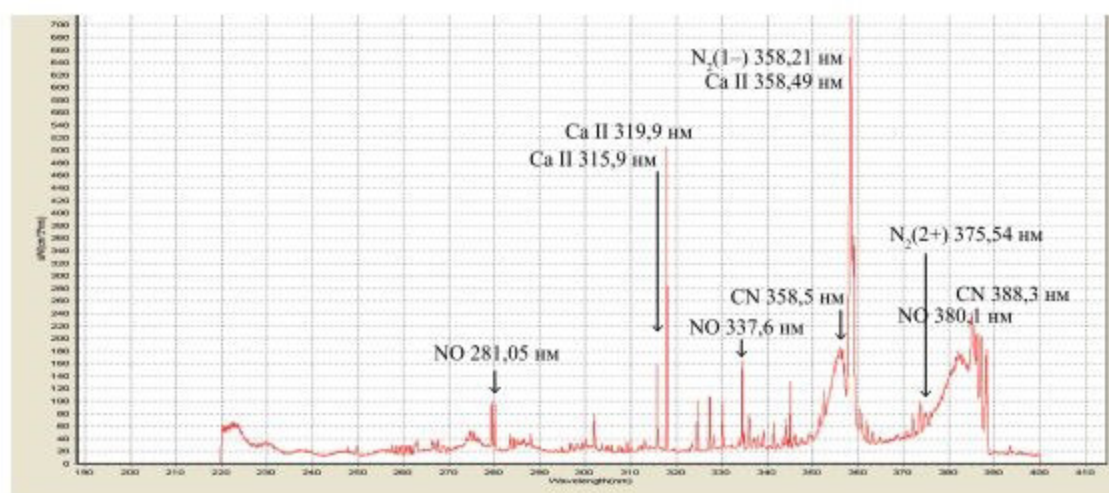


Рис. 11. Спектр излучения УСС в критической точке торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$; $p_{вжк} = 290$ Па; плазмообразующий материал диафрагмы нитрид бора

плотности яркости наиболее сильных полос молекулы циана CN 388,3 нм, CN 358,49 нм, линий ионов углерода CII 358,9 нм и кальция CaII 317,9 нм, CaII 315,8 нм при этом составили 0,24, 0,18, 0,7, 0,5 и 0,15 мВт/(см²ср·нм) соответственно.

Полученные результаты регистрации УСС, который формируется вблизи модельного тела – газовой оболочки, окружающей носовую часть, показали, что эта область потока состоит из смеси продуктов высокотемпературной эрозии стенки отверстия плазмообразующего материала, остаточного воздуха в разрядной камере и продуктов эрозии материала модельного тела из пограничного слоя. Эта область вблизи модельного тела является источником коротковолнового излучения и регистрируется аппаратурой. Как показывают

спектры излучения УСС, в основном излучают атомы и ионы продуктов эрозии основного состава плазмообразующего материала диафрагмы, а также примеси: Fe, Mg, Na, Ca, Ni, Si, Al, Co, Cr, Mn и др. На долю полос атмосферного азота (N₂) приходится ~2 % энергии излучения, а кислорода (O₂) менее 1 %. Среди полос в спектрах обнаружены полосы молекул CN, N₂, N₂⁺, NO.

В таблице приведены молекулярные полосы, которые были зарегистрированы в УФ области спектра в проведенных экспериментах для выбранных условий моделирования высокоскоростного обтекания модельного тела с односторонним клином $\beta_{кл} = 15^\circ$, а также для сравнения основные атмосферные компоненты воздуха и их переходы в системе молекулярных полос.



Таблица

Молекулярные полосы, зарегистрированные в УФ области спектра в экспериментах с набегающей эрозионной плазмой в сравнении с полосами атмосферных компонентов воздуха

Система молекулярных полос	Переход	Максимумы полос, зарегистрированных в экспериментах, нм	Максимумы полос для атмосферных компонент, нм
NO(β)	$V^2\Pi-X^2\Pi$	380,09; 364,72; 357,24; 337,64; 320,69; 275,43; 262,66; 249,34; 243,30; 233,14	380,09; 358,85; 338,64; 320,69; 304,30; 289,26; 275,43; 262,66; 249,34; 243,30; 233,14
NO(γ)	$A^2\Sigma-X^2\Pi$	300,88; 285,95; 281,05; 247,87; 237,02; 259,57	300,88; 285,95; 272,22; 259,57; 247,87; 226,94; 200,3
O ₂ (Ш-Р)	$V^3\Sigma-X^2\Sigma$	374,2; 337,0; 310,4;	421,47; 402,11; 384,11; 367,32; 351,66; 337,01; 323,29; 310,43
O ₂ ⁺	$^3\Pi-^3\Pi$	373,4; 306,3	
N ₂ ⁺	$V^2\Sigma-X^2\Sigma$	391,4; 358,21	391,44; 381,81; 356,39; 353,26; 329,34
N ₂ (2+)	$C^3\Pi-B^3\Pi$	380,49; 375,54; 371,2; 357,69; 337,13; 315,93	405,94; 380,49; 375,54; 357,69; 337,13; 315,93; 297,68; 296,20; 295,32; 281,43
CN $v = +1$	(B-X)	359,04; 358,59; 358,39;	-
CN $v = 0$	(B-X)	388,34; 387,14; 386,19; 385,47	-

Заключение

Предложен и реализован метод физического моделирования УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы, созданным СДР. Структура набегающего потока эрозионной плазмы характеризуется совокупностью таких параметров, как: скорость потока, температура, статическое давление, числа Маха. Созданная моделирующая установка с многоканальным диагностическим комплексом позволяет получать снимки (интерферограммы) структуры ударно сжатого слоя вблизи носка модельного тела и регистрировать спектры излучения, исходящего от разных зон обтекающей носок плазменной струи. Согласно зарегистрированным спектрам, интенсивное свечение наблюдается в линиях атомов и в молекулярных полосах продуктов эрозии плазмообразующего материала диафрагмы с включениями от продуктов абляции поверхности модельного тела. Также устойчиво регистрируются полосы таких атмосферных газов, участвующих в набегающем на модельное тело потоке, как молекулы азота, кислорода и монооксида азота. Показано, что обработка спектров с использованием данных о полуширинах и интенсивностях спектральных линий атомов и молекулярных полос позволяет оценивать для выбранных участков УСС

концентрацию и температуру энергетического распределения электронов, а также вращательную, колебательную и поступательную температуры. Полученная из спектров информация позволяет в дальнейшем делать выводы о равновесности или неравновесности происходящих в струе физических процессов, что определяет важность результатов физического моделирования для верификации расчетных моделей излучения УСС.

Список литературы

1. Гиперзвуковая аэродинамика и тепломассообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов / Под ред. Г. А. Тирского. М.: Физматлит, 2011. 548 с.
2. Яцухно Д. С. Исследование аэродинамики высокоскоростных летательных аппаратов с использованием моделей совершенного и реального газа: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ИПМ им. А. Ю. Ишлинского, РАН. М., 2019.
3. Агафонов В. П., Вертушкин В. К., Гладков А. А. и др. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М., 1972. 321 с.
4. Котов М. А., Рулева Л. Б., Солодовников С. И., Суржиков С.Т. Расчетно-экспериментальные исследования структуры высокоскоростного потока газа при обтекании моделей фрагментов летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана.



- Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 18–30. DOI: 10.18698 / 0236-3941-2017-3-18-30
5. Никитин П. В., Сотник Е. В. Катализ и излучение в системах тепловой защиты космических аппаратов. М.: МАИ, 2013. 390 с.
 6. Калашников Е. В., Калашникова С. Н. Исследование ионной имплантации в условиях струйного диафрагменного разряда в вакууме // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 9. С. 76–81.
 7. Калашников Е. В. Радиальное распределение давления в струе плазмы сильнооточного диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1996. Т. 34, № 4. С. 501–505.
 8. Калашников Е. В. Способ получения ударно сжатого слоя плазмы и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2590893 с приор. от 18.12.2014. Кл. МПК-Н05Н1/42; В64G700.
 9. Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. Л.: Машиностроение, 1985. 264 с.
 10. Прикладная аэродинамика / Под ред. Краснова Н. Ф. М.: Высшая школа, 1974. 732 с.
 11. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 452 с.
 12. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. М., 1971. 552 с.
 13. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
 14. Лапин Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1982. 312 с.
 15. Прутько К. А. Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ЦНИИМаш. Королёв, 2018.
 16. Суржигов С. Т. Компьютерная аэрофизика спускаемых космических аппаратов. Двухмерные модели. М.: Физматлит, 2018. 543 с.

Об авторах

Калашников Евгений Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: оптика, спектроскопия низкотемпературной плазмы, источники излучения высокой интенсивности на основе эрозивной плотной плазмы, методы диагностики быстропротекающих процессов, радиационная магнитная плазменная динамика, исследование гетерофазных сред на основе наночастиц и фракталоподобных структур, экспериментальное моделирование и исследование воздействия факторов околоземного космического пространства на оптические материалы.

Павлов Николай Ильич – доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: создание пеленгационных оптических систем, программно-алгоритмические комплексы имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем наблюдения; исследования характеристик лазерных помех на ИК оптико-электронные системы наблюдения.

Бородин Владимир Григорьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: оптика, наведение и фокусировка пикосекундного лазерного излучения на малоугловые объекты через атмосферу; формирование распределения интенсивности на облучаемых объектах.

Коленчиков Константин Константинович – ведущий инженер, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация. Область научных интересов: оптико-механическое оборудование с высокой точностью позиционирования, юстировка оптических систем.



Комаров Владимир Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов – взаимодействие высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом; высоковакуумное оборудование.

Малинов Владимир Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: генерация пикосекундных лазерных импульсов, юстировка оптических систем, исследование телевизионных камер ИК- и УФ-диапазонов спектра.

Мигель Вячеслав Михайлович – старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: электронные системы управления; программное обеспечение.

Попиков Владимир Сергеевич – старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: лазерная техника, физика и техника высоковольтных источников электропитания, радиоэлектроника, лазерная резка металлов.

Чарухчев Александр Ваникович – кандидат технических наук, начальник лаборатории, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: лазерная физика; взаимодействие излучения с веществом; разработка лазерно-оптических систем.

Luminescence of the shock-compressed layer produced by a plasma flow around the body, using a jet diaphragm discharge

Kalashnikov E. V., Pavlov N. I., Borodin V. G., Kolenchikov K. K., Komarov V. M., Malinov V. A., Migel V. M., Popikov V. S., Charukhchev A. V.

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering ("NII OEP" JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation

The objective of the study is physical simulation and acquisition of experimental data on luminescence of the shock-compressed layer (SCL) and airglow typical of high-velocity objects, using a method for producing a high-velocity flow around the model body based on a jet diaphragm discharge. This paper describes a multi-channel system designed for diagnostics of the SCL that is produced by free-stream erosive plasma flowing around the model body at a velocity ranging from 4 to 50 km/s in low atmospheric pressure conditions. The study findings show that a set of implemented optical and spectral methods allows to diagnose the flow around the model body and to record images of the SCL structure near the front part of the model body as well as SCL radiation spectra.

Keywords: shock-compressed layer, jet diaphragm discharge, erosive plasma



Information about the authors

Kalashnikov Evgeny Valentinovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: optics, low-temperature plasma spectroscopy, high-intensity radiation sources based on erosive dense plasma, methods of fast process diagnostics, radiation magnetoplasma dynamics, study of heterophase media based on nanoparticles and fractal-like structures, experimental simulation and study of the influence of near-Earth space factors on optical materials.

Pavlov Nikolay Ilyich – Doctor of Engineering Sciences, Deputy General Director in Science, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: development of direction finding optical systems, simulation software systems for research and development of optoelectronic observation systems, analysis of characteristics of laser jamming affecting IR optoelectronic observation systems.

Borodin Vladimir Grigorievich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: optics, pointing and focusing picosecond laser radiation on small-angle objects through the atmosphere, forming the intensity distribution on irradiated objects.

Kolenchikov Konstantin Konstantinovich – Lead Engineer, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: optical-mechanical equipment with high positioning accuracy, adjustment of optical systems.

Komarov Vladimir Mikhailovich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: interaction of high-intensity laser radiation with matter, high vacuum equipment.

Malinov Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: picosecond laser pulse generation, adjustment of optical systems, study of IR and UV television cameras.

Migel Vyacheslav Mikhailovich – Senior Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: electronic control systems, software.

Popikov Vladimir Sergeevich – Senior Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: laser technology, physics and technology of high-voltage power supply sources, radio electronics, laser cutting of metals.

Charukhchev Aleksandr Vanikovich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: laser physics, interaction of radiation with matter, development of laser optical systems.