

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (01.04.14)

УДК 533.9.07

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-124-132

Измерение скорости плазменной струи по движению внесенных в нее оптических неоднородностей

Д.И. Кавыршин, М.А. Саргсян, С.В. Горячев, М.А. Хромов, В.Ф. Чиннов, А.В. Мордынский

Описан метод введения в дозвуковую плазменную струю оптических неоднородностей (ОН), скоростная визуализация которых обеспечивает возможность поиска пространственных распределений скорости движения плазмы. В качестве источника ОН использованы цилиндрические стержни малого диаметра из графита и меди. Выполненная регистрация фоторазверток движения ОН с одновременной регистрацией спектров излучения плазмы вблизи поверхности маркера указывает на незначительность гидродинамического и теплового возмущений плазменной струи.

Экспериментально установлено, что время воздействия плазменных струй аргона, азота и воздуха со среднemasсовой температурой около 10000 К и скоростью 100...200 м/с на стержни из Си и С диаметром 1 мм без их разрушения составляет 0,4...1,0 с, что дает полную картину движения вносимых в плазменную струю оптических неоднородностей на участке протяженностью в несколько ее диаметров при скорости видеорегистрации порядка 10000 с⁻¹.

Описан алгоритм программной обработки видеogramм с целью получения поля скоростей дозвуковой плазменной струи, состоящий в определении пространственно-временных изменений границ оптических неоднородностей путем последовательного построения поля градиентов интенсивностей их свечения, распознавания, фильтрации и сравнения границ.

Ключевые слова: плазма, неустановившееся течение, затопленная струя, поле скоростей, оптическая неоднородность, скоростная визуализация.

Для цитирования: Кавыршин Д.И., Саргсян М.А., Горячев С.В., Хромов М.А., Чиннов В.Ф., Мордынский А.В. Измерение скорости плазменной струи по движению внесенных в нее оптических неоднородностей // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 124—132. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-124-132.

Plasma Jet Velocity Measurement by Visualizing the Motion of Introduced Optical Inhomogeneities

D.I. Kavyrshin, M.A. Sargsyan, S.V. Goryachev, M.A. Khromov, V.F. Chinnov, A.V. Mordynsky

A method for introducing optical inhomogeneities (OI) into a subsonic plasma jet is described. High-speed visualization of such OI opens the possibility of determining spatial distributions of plasma motion velocity. Small-diameter cylindrical graphite and copper rods were used as the OI source. The results obtained from recording the OI motion photographic images with simultaneously recording the plasma emission spectra near the marker surface indicate that the plasma jet hydrodynamic and thermal perturbations are insignificant in nature.

It has been experimentally established that the time for which the Cu and C rods 1 mm in diameter withstand the effect of argon, nitrogen and air plasma jets with a bulk temperature of about 10 000 K and velocity of 100...200 m/s without destruction is 0.4...1.0 s. This time is enough to obtain a complete motion pattern of the OI introduced into the plasma jet in a segment with a length of several jet diameters at a video recording rate of around 10 000 s⁻¹.

The article describes an algorithm for processing video images by means of software with a view to obtain the subsonic plasma jet velocity field, which involves determination of the spatial-temporal changes in the IO boundaries by sequentially constructing the gradient field of their luminescence intensities, recognizing, filtering, and comparing the IO boundaries.

Key words: plasma, unsteady current, submerged jet, velocity field, optical inhomogeneity, high-speed visualization.

For citation: Kavyrshin D.I., Sargsyan M.A., Goryachev S.V., Khromov M.A., Chinnov V.F., Mordynsky A.V. Markov Plasma Jet Velocity Measurement by Visualizing the Motion of Introduced Optical Inhomogeneities. MPEI Vestnik. 2019;1:124—132. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-124-132.

Введение

Низкотемпературные затопленные плазменные струи широко применяются в научных исследованиях и технологиях, как в качестве объекта исследования, так и в виде высокоэнтальпийных источников энергии. Большую научную и практическую ценность представляет информация о распределении скорости в продольном и радиальном сечениях затопленного плазменного потока. Эффективное использование существующих в гидродинамике способов измерения скорости потоков в экспериментах с плазменными объектами сопряжено с рядом трудностей. Наиболее простой и часто применяемый в опытах с плазменными струями метод трубки полного напора (трубки Пито) позволяет измерять локальную скорость плазменного потока за счет малого диаметра (до 0,5 мм) трубки [1 — 4]. Основным недостатком данного метода при дозвуковом течении является большая погрешность определения скорости, поскольку измеряемая разность полного p и статического p_0 давлений $p - p_0 = \rho v^2/2$ невелика, а поток плазмы сильно неизохоричен. К тому же при плазменных исследованиях необходимо охлаждать трубку, что усложняет систему и вносит дополнительное возмущение в поток.

В современных исследованиях мгновенных значений поля скоростей в заданном сечении газового потока применяются PIV- (Particle Image Velocimetry) [5], PTV- (Particle Tracking Velocimetry) [6] методы и метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [7 — 9]. PIV- и PTV-методы основаны на измерении смещения микрочастиц-маркеров за время между двумя лазерными импульсами, подсвечивающими эти частицы в определенной плоскости. Метод ЛДА базируется на измерении доплеровского сдвига частоты рассеянного на частицах-маркерах лазерного излучения. Характерный размер частиц (от долей до нескольких микрон) выбирается таким, чтобы частицы двигались без существенного проскальзывания относительно потока. Преимуществами названных лазерных методов являются отсутствие возмущающего действия на поток и возможность изучения сложных турбулентных течений.

Описание предлагаемого метода и измерительного комплекса

Желание распространить идею определения скоростных характеристик потоков, наблюдая за перемещением специальных засеиваемых в них маркеров,

успешно реализуемую в PIV- и PTV-методах, на исследование течений дозвуковых плазменных сред с температурами, намного превышающими пределы живучести самых термостойких маркеров (оксиды, нитриды, бориды, графит и его производные), привело к идее использования в качестве индикаторов локальной скорости потоков продукты взаимодействия плазмы и помещенного в него термостойкого материала (оптические неоднородности). Реализация идеи потребовала минимизации возмущающего действия на движущуюся плазму искусственно созданных оптических неоднородностей (ОН) путем правильного выбора термостойкого материала и экспериментального установления условий, при которых скорость движения ОН могла быть отождествлена со скоростью движения плазменного потока. Для цилиндрически симметричной системы сечением, в котором следует определять профиль продольной скорости движения, является ее диаметрального сечения вдоль оси струи. В рассматриваемом методе это сечение задается помещением в него источника ОН в виде тонкого стержня. Схема введения ОН в плазменную струю и измерительный комплекс представлены на рис. 1. Маркерный стержень выбранных размеров и материала 3 с помощью электромагнитного привода 4 на короткое время (менее 1 с) устанавливает поперек генерируемого плазматроном 1 плазменного потока 2 на продольной его оси и в выбранной продольной координате.

Продукты испарения и абляции, возникающие на нагреваемой плазмой поверхности стержня, увлекаются плазменным потоком и образуют долгоживущие светящиеся плазменные образования 5 (оптические неоднородности), представляющие собой сублимационные облака возбужденных атомов, молекул и кластеров материала стержня и продуктов их плазмохимического взаимодействия с веществом плазмы. Неоднородности регистрируют высокоскоростной видеокамерой 6, которая в выбранном масштабе и с требуемым пространственным разрешением выполняет покадровую съемку протяженной области струи $\Delta z = D$ с частотой и экспозицией, определяемой светимостью неоднородностей и скоростью их движения. Одноканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec 3648 7 с диапазоном 220...1100 нм и спектральным разрешением около 1 нм и трехканальный спектрометр AvaSpec 3648 8 со спектральным диапазоном 220...1100 нм и разрешением 0,2...0,5 нм регистрируют спектры излучения поверхности образца и плазмы вблизи нее. Расположение

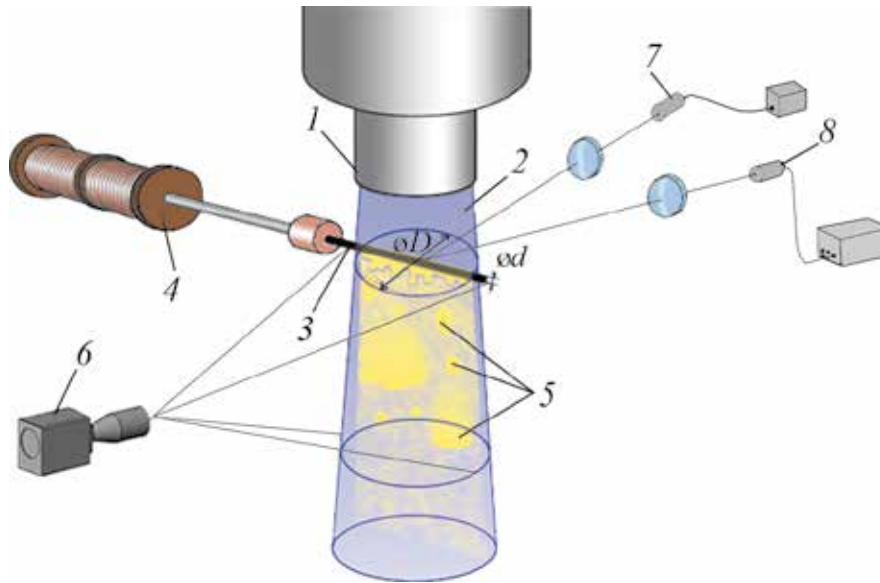


Рис. 1. Схема устройства для видеорегистрации движения оптических неоднородностей:

1 — плазмотрон; 2 — плазменный поток; 3 — сублимирующий графитовый стержень; 4 — система ввода-вывода стержня; 5 — оптические неоднородности; 6 — видеокамера; 7, 8 — оптоволоконные спектрометры

видеокамеры по отношению к стержню обеспечивает измерение локальной скорости по фоторазверткам движения ОН по продольной и поперечной координатам потока вниз по течению от стержня в плоскости, проходящей через стержень и продольную ось плазмы.

Временные характеристики видеорегистрации приведены в таблице в зависимости от характерной скорости движения плазмы.

Временные характеристики видеорегистрации

V , м/с	Частота кадров ν , с ⁻¹	Время экспозиции τ , мкс
10	10^3	200
10^2	10^4	20
10^3	10^5	2

Видеорегистрация неоднородностей обеспечивает необходимую информационную базу для программной обработки и получения надежной выборки данных о локальных значениях реальной скорости движения плазмы в дозвуковых плазменных потоках любых протяженностей и поперечных размеров.

Поперечный размер (диаметр d) вносимого материала не должен вызывать гидродинамического возмущения струи ($d \ll D_{пл}$), а его термическая стойкость обеспечивает время его жизни, достаточное для выполнения измерений скорости плазмы. При $U = 100 \dots 200$ м/с это время регистрации нескольких (до 10) тысяч кадров видеосъемки, т. е. $\tau_m = \frac{N}{\nu} = \frac{10^4}{25 \cdot 10^3} = 0,4$ с. В данном случае при скорости потока плазмы азота $U = 100 \dots 200$ м/с в месте введения стержня с диаметром $d = 0,7 \dots 1,0$ мм число

Рейнольдса $Re \leq 10$. При этом значении реализуется схема обтекания, при которой за цилиндром образуется циркуляционная область длиной не более одного диаметра стержня [10, 11]. Таким образом, возмущающее гидродинамическое воздействие стержня на плазменный поток можно считать незначительным.

Микрочастицы материала стержня, используемые в качестве маркеров скорости, должны двигаться в плазменном потоке без существенного проскальзывания относительно окружающей газовой среды. Для оценки динамической инерционности дисперсной фазы используется выражение [12, 13]:

$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{C}; \quad \tau_{p0} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu};$$

где τ_{p0} — время динамической релаксации стоксовой частицы ($Re_p \leq 1$); C — поправочная функция, учитывающая влияние сил инерции на время релаксации нестоксовой частицы; d_p , ρ_p — характерный размер и плотность частицы; μ — динамическая вязкость плазмы.

Если положить значение $d_p = 10$ мкм и принять динамическую вязкость плазмы азота при температуре $T = 10\,000$ К, равной $\mu = 0,2$ г/м·с [14] при плотности микрочастицы $\rho_p = 1$ г/см³, то время динамической релаксации стоксовой частицы окажется $\tau_p = 2,7 \cdot 10^{-6}$ с. Данное значение τ_p при скорости потока 200 м/с означает достижение частицей скорости потока на пути длиной 0,25 см. В качестве материалов избраны и испытаны медный провод, вольфрамовые и графитовые стержни.

В медном проводе диаметром $d = 1 \dots 2$ мм возникшая неоднородность регистрируется на протяжении

времени до нарушения однородности стержня вследствие плавления меди под воздействием плазмы с температурой электронов $T_e = 10\,000$ К. Время до начала плавления медного провода оценим по формулам

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{\rho_{\text{Cu}} V_{\text{ст}} C_p (T_{\text{пл}} - T_0)}{q_0 S_{\text{ст}}};$$

$$q_0 = \alpha \Delta T,$$

где ρ_{Cu} , C_p — плотность и удельная теплоемкость меди; $V_{\text{ст}}$, $S_{\text{ст}}$ — объем и площадь поверхности участка медной проволоки, попавшего в струю; $T_{\text{пл}}$, T_0 — температура плавления и начальная температура меди; q_0 — удельный тепловой поток на проволоку; α — коэффициент теплопередачи.

При $C_p = 0,4$ Дж/г·К, $\rho_{\text{Cu}} = 8,92$ г/см³, диаметра струи $D = 60$ мм и стержня $d = 1$ мм $T_{\text{пл}} - T_0 = 1100$ К, $\alpha = 0,2$ Вт/см²·К, $\Delta T \approx 100\,000$ К. Оценка дает значение времени начала плавления $\tau_{\text{пл}} \approx 0,1$ с. Эксперименты эту оценку подтверждают.

Для вольфрамовых стержней диаметром 1,0 и 2,0 мм оценка дает значение времени начала плавления плазменным потоком с температурой 8000 К $\tau_{\text{пл}} = 2 \dots 4$ с.

Теплостойкость графитовых стержней диаметром 0,7 и 2,0 мм позволяет выдержать тепловую нагрузку ~ 500 Вт/см² при нагреве до 3000 К (начало интенсивной абляции):

$$\tau_{\text{субл}} = \frac{m_{\text{тр}} C_p (T_{\text{пл}} - T_0)}{q_0 S}.$$

При $C_p = 2$ Дж/г·К; $m_{\text{тр}} = 0,8$ г; $T_{\text{пл}} - T_0 = 3000$ К; $q_0 = 10^5$ Вт/см², $S = 4$ см. Время до начала интенсивной абляции равно $\tau_{\text{субл}} \geq 1$ с.

При использовании графитовых стержней неоднородность свечения обусловлена появляющимся «облаком» аблирующего и сублимирующего углерода. Как показали предварительные опыты, еще одним видом оптических неоднородностей, наблюдаемых на кадрах скоростной видеорегистрации, являются многочисленные треки микрочастиц, сносимых с поверхности стержней плазменным потоком. Отличающиеся размерами (от долей до десятков мкм) и скоростью, обусловленной эффектом проскальзывания, они существенным образом расширяют экспериментальную базу для статистического анализа движения ОН с целью определения локальных скоростей плазменного потока.

Информативность видеоматериала при высокоскоростной регистрации ОН, возникших вследствие внесения в плазменный поток графитового стержня, проиллюстрирована рис. 2, где представлена последовательность из 10 кадров, зарегистрированных скоростной камерой Motion Pro с частотой 5000 с⁻¹ и временем экспозиции 50 мкс.

Плазма движется слева направо со скоростью около 50 м/с, диаметр графитового стержня $d = 2$ мм, диаметр плазменной струи $D = 60$ мм, наблюдаемый на кадрах

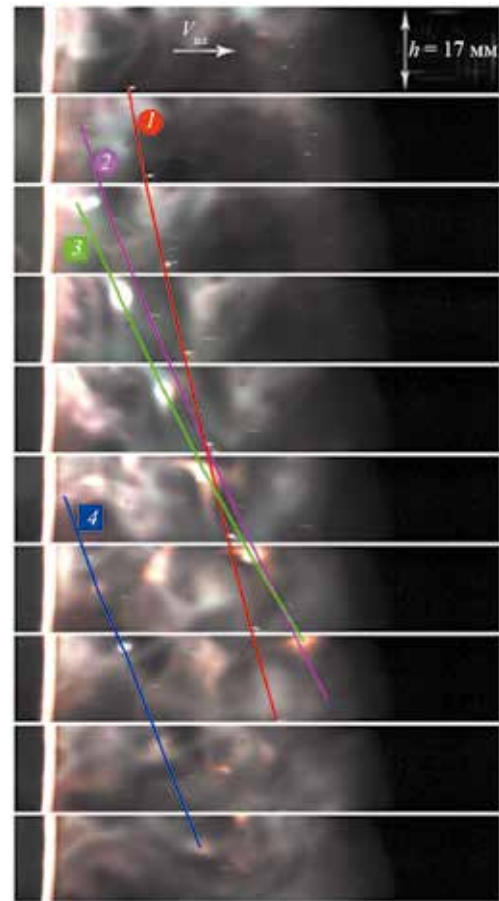


Рис. 2. Видеорегистрация оптических неоднородностей, созданных внесенным в струю графитовым стержнем:

1, 2 — многочисленные треки частиц графита, сносимых с поверхности стержня плазменным потоком, отличающиеся размерами (определяется поперечным размером (толщиной) трека) и скоростью (длиной трека и временем экспозиции); 3, 4 — плазменные сгустки, отличающиеся ярким свечением, цветом, компактностью формы и слабым ее изменением, что позволяет фиксировать местоположение геометрического центра сгустка

отрезок стержня вблизи осевой зоны струи — 17 мм, полная длина стержня — 120 мм. На видеокдрах наблюдается два вида оптических неоднородностей, возникших в результате термического воздействия плазмы с температурой электронов $T_e \approx 10\,000$ К (измерена спектроскопически в набегающем слева потоке):

Плазменные сгустки 3, 4 имеют атомарную природу, т. е. состоят из атомов и молекул сублимированного углерода C_2 , C_5 , ..., C_8 и продуктов их взаимодействия с плазмой воздуха, поэтому они движутся со скоростью подхватившего их плазменного потока. Скорость движения геометрических центров этих фрагментов устанавливают по масштабу их перемещения и длительности времени между соседними видеокдрами $\tau = 1/v$.

Анализ покадровой регистрации (см. рис. 2) позволяет измерить локальные скорости плазмы по $\{(z, r) - t\}$ -

диаграмме движения плазменных сгустков (координата $r = 0$ соответствует оси струи). Скорость определяется из соотношения

$$V_{\text{ПС}}^{N,N+1} = \frac{\Delta z_{N,N+1}}{1/\nu}, \quad (1)$$

где $\Delta z_{N,N+1}$ — путь, пройденный геометрическим центром сгустка вдоль оси z за время между двумя последовательными кадрами N и $N + 1$; ν — частота кадров.

Результаты исследования скорости по движению оптических неоднородностей

Картина ввода медного стержня в плазменную струю и возникновения ОН приведена на рис. 3. Кадры получены при частоте съемки $25 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и времени экспозиции 2 мкс. На рис. 3 слева направо последовательно показан процесс абляции медного стержня 2 в потоке плазмы азота 1 на стадиях ввода ($t = 0 \text{ мс}$), активной абляции ($t = 40 \text{ мс}$) и разрушения ($t = 80 \text{ мс}$). Время жизни стержня при указанной частоте съемки позволяет получить 2000 кадров со статистикой движения ОН, которых достаточно для оценки скорости плазменного потока. При этом в спектре излучения наблюдаются несколько ярких линий CuI, а общая картина спектра практически не меняется относительно случая невозмущенной плазмы. Температура электронов, оцененная из распределения относительных интенсивностей спектральных линий CuI (плазма со стержнем) и NI (без стержня), в обоих случаях равна $T_e \approx 10\,000 \text{ К}$.

Наблюдаемые неоднородности в том же режиме съемки при использовании стержня из графита диаметром 0,7 мм представлены на рис. 4 в виде последовательности кадров от верхнего левого до нижнего правого (набегающая струя 1 и расположенный в ее центре графитовый стержень 2). Плазма движется сле-

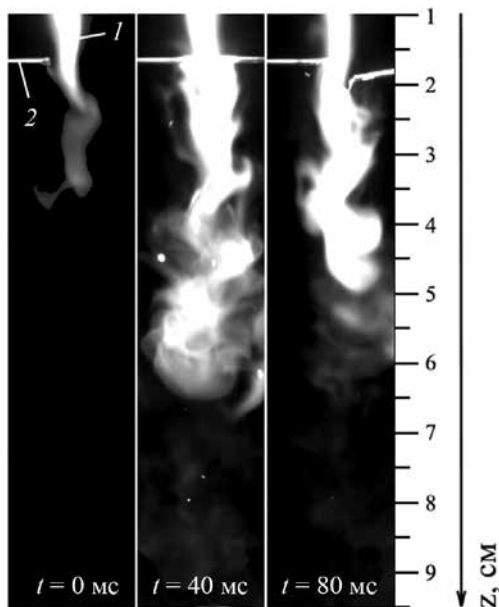


Рис. 3. Медный стержень 2 ($d = 1 \text{ мм}$) в потоке плазмы азота 1

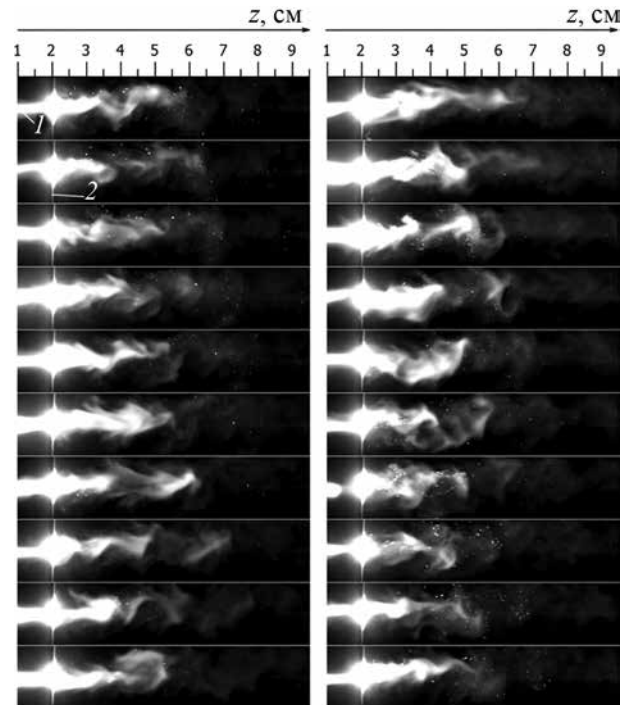


Рис. 4. Динамика движения оптических неоднородностей в графитовом стержне 2 ($d = 0,7 \text{ мм}$) в потоке плазмы азота 1: частота — 25 кГц, экспозиция — 2 мкс

ва направо со скоростью около 100 м/с, оцененной по скорости движения ОН. Эксперименты показали, что время жизни графитового стержня такого диаметра в плазме азота с температурой электронов $T_e \approx 10\,000 \text{ К}$ составляет $\tau \geq 1 \text{ с}$.

Для анализа возмущающего влияния сублимата графита на температуру и скорость набегающей на стержень азотной плазменной струи выполнена регистрация спектра излучения плазмы из области струи, в 1...2 мм от стержня вниз по потоку. Полученные спектры изображены на рис. 5. При введении стержня существенно возрастает интенсивность полос CN (вследствие нитризации сублимата графита в реакции $\text{C} + \text{N} \rightarrow \text{CN}$), появляются линии углерода CI. По интенсивности наблюдаемых в обоих спектрах атомарных линий NI и ряда молекулярных полос могут быть оценены электронная температура плазмы и колебательная и вращательная температуры молекул. Выполненное для обоих случаев моделирование молекулярных спектральных полос N_2 , N_2^+ , CN приводит к близким значениям $T_v = T_r = 8000 \text{ К}$, что свидетельствует о незначительности теплового возмущения, вызванного вводом стержня.

При внесении в плазму стержня из вольфрама наблюдается иная картина. В спектре появляются десятки интенсивных линий WI в диапазоне 250...450 нм, что приводит к значительному радиационному охлаждению плазмы. Вследствие этого азот NI в спектре полностью исчезает, а температура электронов, определенная по интенсивностям спектральных линий WI,

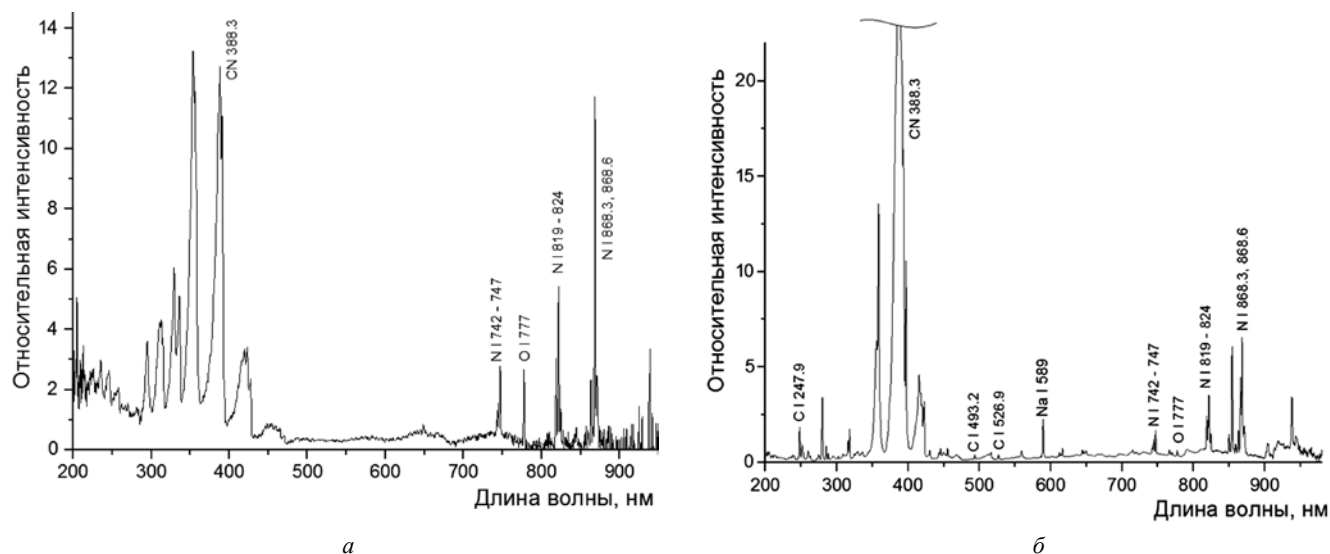


Рис. 5. Спектры излучения плазмы в исследуемой зоне без графитового стержня (а) и при введении его (б)

составляет всего $T_e = 6000$ К, при температуре плазмы в невозмущенном потоке около $T_e = 10\,000$ К.

В экспериментах с вводом графитового и вольфрамового стержней в спектре появляется сплошной спектр теплового излучения нагретых стержней (рис. 6). Определенные по методу координат Вина [15—17] температуры для графита и вольфрама составили $T_C = T_W = 2750$ К.

Для анализа движения ОН разработана программа распознавания. Изначально она определяет границы неоднородностей путем построения поля градиентов интенсивностей их свечения, затем использует инте-

активный алгоритм распознавания [18, 19], фильтрации и сравнения границ неоднородностей, позволяющий анализировать в разные моменты времени только подходящие по заданным критериям подобия (размеры, отклонение от траектории) оптические неоднородности и использовать координаты границ для расчета скорости их перемещения по (1).

На рисунке 7 представлена диаграмма неразрешенных по радиусу струи значений продольной составляющей скорости движения сублимата в потоке плазмы азота, полученная в результате анализа контрастных (лежащих в плоскости фокусировки) неоднородностей с

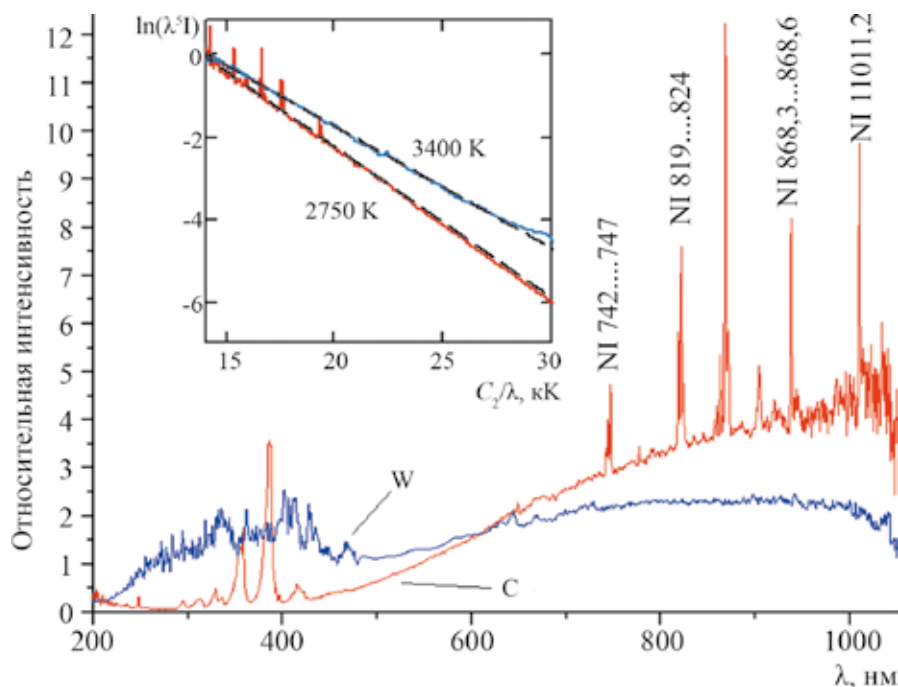


Рис. 6. Спектр излучения нагретых графитового и вольфрамового стержней с наложенным на него спектром плазменного излучения

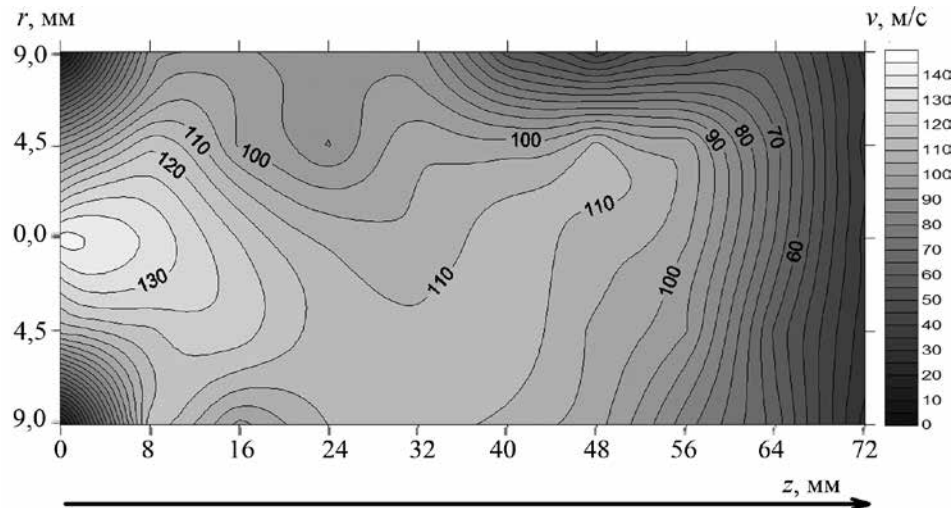


Рис. 7. Распределение продольной составляющей скорости движения неоднородностей вдоль оси струи: ток дуги $I = 250$ А; расход азота $G = 1$ г/с; графитовый стержень $d = 0,7$ мм; диаметр струи $D = 20$ мм

использованием описанного алгоритма в зависимости от продольной и радиальной координат относительно среза сопла. При составлении диаграммы использовалось около 5000 распознанных объектов. Изолинии на диаграмме характеризуют скорость в диаметральной сечении струи, на левой границе которого расположен стержень.

Анализируя полученную диаграмму, следует отметить, что на расстояниях от выходного сечения сопла $z > 50$ мм скорость резко падает, что связано с торможением релаксирующей затопленной струи.

Заключение

Достоинствами предложенного метода являются его простота и доступность по сравнению с дистанционными лазерными методами и возможности опреде-

ления профилей мгновенной скорости, а также одновременного наблюдения протяженной области течения.

Показан вариант использования продуктов абляции графитового и испарения медного стержня в затопленной струе плазмы азота в качестве маркеров, по перемещению которых можно определить локальную скорость плазменного потока.

В стадии дальнейшего развития алгоритм распознавания оптических неоднородностей (сгустков продуктов абляции) позволит анализировать движение $N \approx 5000$ объектов.

К одной из основных проблем метода следует отнести отсутствие точной привязки неоднородностей к радиальной координате. Ее решение будет обеспечено путем регистрации неоднородностей двумя синхронно работающими высокоскоростными камерами методами многоакурсной томографии [20].

Литература

1. Дресвин С.В., Клубник В.С. Измерение скорости течения плазмы трубкой полного напора // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. № 4. С. 633—640.
2. Choi S. e. a. Effects of Anode Nozzle Geometry on Ambient Air Entrainment Into Thermal Plasma Jets Generated by Nontransferred Plasma Torch // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. No. 2. Pp. 473—478.
3. Capetti A., Pfender E. Probe Measurements in Argon Plasma Jets Operated in Ambient Argon // Plasma Chemistry and Plasma Proc. 1989. V. 9. No. 2. Pp. 329—341.
4. Занько Ф.С., Михеев А.Н., Хайрнасов К.Р. Термоанемометрические измерения скорости при изменяющейся температуре потока // Труды Академэнерго. 2013. № 4. С. 7—12.
5. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry. Berlin: Springer, 2001
6. Maas H.G., Gruen A., Papantoniou D. Particle Tracking Velocimetry in Three-dimensional Flows // Experiments in Fluids. 1993. V. 15. No. 2. Pp. 133—146.

References

1. Dresvin S.V., Klubnikin V.S. Izmerenie Skorosti Tcheniya Plazmy Trubkoy Polnogo Napora. Teplofizika Vysokih Temperatur. 1969;7;4:633—640. (in Russian).
2. Choi S. e. a. Effects of Anode Nozzle Geometry on Ambient Air Entrainment Into Thermal Plasma Jets Generated by Nontransferred Plasma Torch. IEEE Trans. Plasma Sci. 2004;32;2:473—478.
3. Capetti A., Pfender E. Probe Measurements in Argon Plasma Jets Operated in Ambient Argon. Plasma Chemistry and Plasma Proc. 1989;9;2:329—341.
4. Zan'ko F.S., Miheev A.N., Hayrnasov K.R. Termoanemometricheskie Izmereniya Skorosti pri Izmenyayushcheysya Temperature Potoka. Trudy Akademenergo. 2013;4;7—12. (in Russian).
5. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry. Berlin: Springer, 2001
6. Maas H.G., Gruen A., Papantoniou D. Particle Tracking Velocimetry in Three-dimensional Flows. Experiments in Fluids. 1993;5;2:133—146.

7. **Abbiss J.B., Chubb T.W., Pike E.R.** Laser Doppler Anemometry // Optics & Laser Techn. 1974. V. 6. No. 6. Pp. 249—261.
8. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
9. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С., Фомин Н.А.** Новые методы лазерной анемометрии в исследованиях сложных газодинамических течений // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 6. С. 3—12.
10. **Бэтчелор Д.** Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
11. **Ван-Дайк М.** Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1985.
12. **Вараксин А.Ю.** Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421—455.
13. **Вараксин А.Ю.** Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2008.
14. **Низкотемпературная плазма.** Новосибирск: Наука, 1991.
15. **Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Тюфтяев А.С., Чиннов В.Ф.** Исследование генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода и некоторые его применения // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 1. С. 1—30.
16. **Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И.** Мощный генератор низкотемпературной плазмы воздуха с расширяющимся каналом выходного электрода // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 2. С. 44—49.
17. **Магунов А.Н.** Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.
18. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
19. **Свидетельство № 2017660959** о гос. регистрации программ для ЭВМ. Программа графической обработки высокоскоростной регистрации оптических неоднородностей в плазменной струе / А.В. Мордынский, М.Х. Гаджиев. М.: Российский экономический ун-т им. Г.В. Плеханова, 2017.
20. **Пикалов В.В., Мельникова Т.С.** Томография плазмы. Новосибирск: Наука, 1995.
7. **Abbiss J.B., Chubb T.W., Pike E.R.** Laser Doppler Anemometry. Optics & Laser Techn. 1974;6;6: 249—261.
8. **Dubnishchev Yu.N., Rinkevichyus B.S.** Metody lazernoy Doplerovskoy Anemometrii. M.: Nauka, 1982. (in Russian).
9. **Dubnishchev Yu.N., Rinkevichyus B.S., Fomin N.A.** Novye Metody Lazernoy Anemometrii v Issledovaniyah Slozhnyh Gazodinamicheskikh Techeniy. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2003;76;6;3—12. (in Russian).
10. **Betchelor D.** Vvedenie v Dinamiku Zhidkosti. M.: Mir, 1973. (in Russian).
11. **Van-Dayk M.** Al'bom Techeniy Zhidkosti i Gaza. M.: Mir, 1985. (in Russian).
12. **Varaksin A.Yu.** Hidrogazodinamika i Teplofizika Dvuhfaznyh Potokov: Problemy i Dostizheniya. Teplofizika Vysokih Temperatur. 2013;51;3:421—455. (in Russian).
13. **Varaksin A.Yu.** Stolknoveniya v Potokah Gaza s Tverdymi Chastitsami. M.: Fizmatlit, 2008. (in Russian).
14. **Nizkotemperaturnaya Plazma.** Novosibirsk: Nauka, 1991. (in Russian).
15. **Isakaev E.H., Sinkevich O.A., Tyuftyaev A.S., Chinnov V.F.** Issledovanie Generatora Nizkotemperaturnoy Plazmy s Rasshiryayushchimsya Kanalom Vyhodnogo Elektroda i Nekotorye Ego Primeneniya. Teplofizika Vysokih Temperatur. 2010;48;1:1—30. (in Russian).
16. **Gadzhiev M.H., Isakaev E.H., Tyuftyaev A.S., Yusupov D.I.** Moshchnyy Generator Nizkotemperaturnoy Plazmy Vozduha s Rasshiryayushchimsya Kanalom Vyhodnogo Elektroda. Pis'ma v ZHTF. 2016;42;2:44—49. (in Russian).
17. **Magunov A.N.** Spektral'naya Piroometriya. M.: Fizmatlit, 2012. (in Russian).
18. **Gonsales R., Vuds R.** Tsifrovaya Obrabotka Izobrazheniy. M.: Tekhnosfera, 2005. (in Russian).
19. **Svidetel'stvo № 2017660959** o Gos. Registratsii Programm dlya EVM. Programma Graficheskoy Obrabotki Vysokoskorostnoy Registratsii Opticheskikh Neodnorodnostey v Plazmennoy Strue / A.V. Mordynskiy, M.H. Gadzhiev. M.: Rossiyskiy Ekonomicheskiy Un-t im. G.V. Plekhanova, 2017. (in Russian).
20. **Pikalov V.V., Mel'nikova T.S.** Tomografiya Plazmy. Novosibirsk: Nauka, 1995. (in Russian).

Сведения об авторах:

Кавыршин Дмитрий Игоревич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, e-mail: dimakav@rambler.ru

Саргсян Микаэл Арменович — младший научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, e-mail: m.sargsyan86@mail.ru

Горячев Сергей Викторович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, e-mail: 9060427433@mail.ru

Хромов Максим Александрович — аспирант кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: m.khromov.work@gmail.com

Чиннов Валерий Федорович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, e-mail: v_chinnov@oivtran.ru

Мордынский Александр Витальевич — младший научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, e-mail: weldi@rambler.ru

Information about authors:

Kavyrshin Dmitriy I. — Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Researcher of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: dimakav@rambler.ru

Sargsyan Mikael A. — Junior Researcher of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: m.sargsyan86@mail.ru

Goryachev Sergey V. — Ph.D. (Phys.-Math.), Research Assistant of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: 9060427433@mail.ru

Khromov Maksim A. — Ph.D.-student of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: m.khromov.work@gmail.com

Chinnov Valeriy F. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: v_chinnov@oivtran.ru

Mordynsky Aleksandr V. — Junior Researcher of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: weldi@rambler.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ (проект № 17-08-00816)

The work is executed at support: RFBR (grants No. 17-08-00816)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.12.2017

The article received to the editor: 27.12.2017