

УДК 536.521.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДА СИЛЬНОТОЧНОЙ ДУГИ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МАТРИЦЫ

© 2008 г. С. В. Горячев, Э. Х. Исакаев, М. И. Мясников, В. Ф. Чиннов

*Объединенный институт высоких температур, Москва*

*125412 Москва, Россия, Ижорская 13, стр. 2*

*e-mail: v\_chinnov@oivtran.ru*

Поступила в редакцию 14.11.2007 г.

В работе предложен метод пространственно-временного анализа температурных полей на поверхности вольфрамового катода сильноточечной электрической дуги с помощью высокоскоростной видеокамеры VS-FAST (изготовитель – фирма “ВидеоСкан”, Москва). Рассмотрена роль и указаны способы учета вклада излучения плазмы в измеряемую излучательную способность поверхности катода. Экспериментально показана возможность использования названной скоростной камеры в качестве пирометра, обеспечивающего временное разрешение до 2 мкс и пространственное разрешение около 30 мкм.

PACS: 52.70.-m

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловое состояние поверхности, а также величина и характер эрозии термоэмиссионных катодов сильноточечных плазменных систем определяют их работоспособность и ресурс работы [1, 2]. Взаимодействующая система электрод – прикатодная плазма является сложным объектом для исследования, характеризующимся сильной пространственно-временной неоднородностью. Неоднородности температурных полей поверхности термоэмиссионных катодов могут приводить к зонам локального перегрева, испарению материала, его разрушению в результате трещинообразования и другим явлениям и процессам, определяющим ресурс катода [3]. По этой причине пространственно-временной анализ температурных полей на энергонапряженной поверхности катодов сильноточечных электрических дуг – важная исследовательская задача. В работе показана возможность использования высокоскоростной цифровой видеокамеры отечественного производства в качестве микропирометра, обеспечивающего временное разрешение до 2 мкс и пространственное разрешение около 30 мкм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА

Схема устройства для измерений излучательной способности катода и прилегающей к нему плазмы представлена на рис. 1. Исследовались сильноточечные (200–500 А) аргоновая и азотная дуги атмосферного давления в плазматроне с расширяющимся анодным каналом [4]. Наблюдение

за областью взаимодействия “приэлектродная плазма – вольфрамовый катод” осуществлялось через отверстия в сопле плазматрона (см. рис. 1) с диаметром “горла” сопла 4 мм. Два смотровых отверстия в сопле имели форму эллипса с осями 2.5 и 1.5 мм, при этом большая ось была ориентирована вдоль оси Z плазматрона. Катод, выполненный из лантанированного вольфрамового прутка диаметром 5–8 мм, запрессованного и впаянного в массивную медную водоохлаждаемую обойму, заканчивался конусом с углом при вершине 80–90°. Резкое изображение области плазма-катод размером 2.5 × 1.5 мм одновременно проецировалось объективом “Телиос-40” на матрицу высокоскоростной камеры VS-FAST с увеличением 2 : 1 и на входную щель спектрографа ДФС-452 в масштабе 1.6 : 1 с использованием конденсора и призмы Дове для ориентации изображения горизонтально горячей дуги вдоль входной щели спектрографа. На выходе спектрографа ДФС-452 располагался анализатор спектра МОАС-2 [5, 6] с двумя ПЗС-линейками. С помощью горизонтальной линейки регистрировался спектр излучения исследуемой плазмы при выбранном значении координаты, а с помощью вертикальной – фиксировалось распределение по координате Z (вдоль оси дуги) интенсивности излучения из области прикатодной плазмы – катод на требуемой длине волны. Измерение распределений интенсивности проводилось в диапазоне длин волн 450–1000 нм с шагом 50 нм. Регистрируемое вертикальной линейкой распределение свечения области плазма-катод охватывало участки спектра шириной около 0.3 нм, свободные от спектральных линий плазмы.

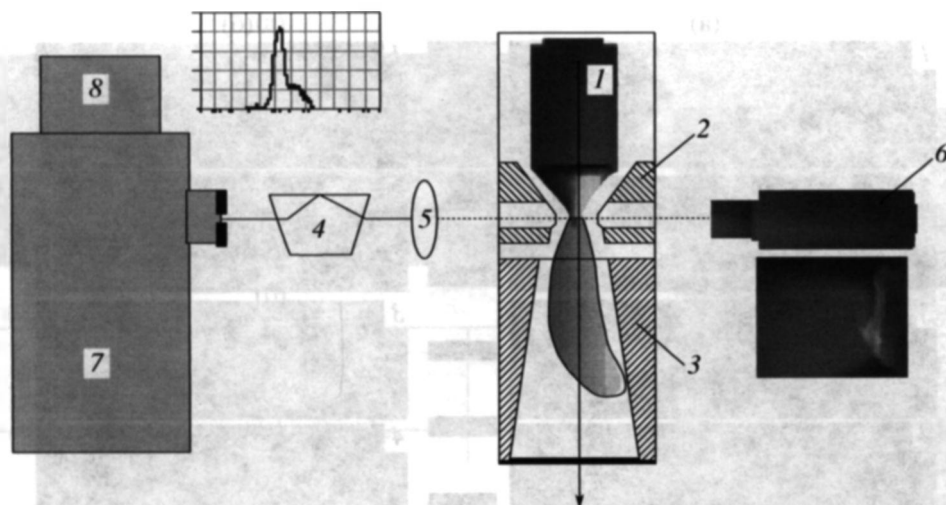


Рис. 1. Система согласованных измерений излучательной способности W-катода: 1 – катод, 2 – сопло со смотровыми отверстиями, 3 – анод, 4 – призма Дове, 5 – линза, 6 – камера VS-FAST, 7 – спектрограф ДФС-452, 8 – блок с двумя ПЗС-линейками.

В системе скоростной видеосъемки на базе камеры VS-FAST (фирма “ВидеоСкан”, Москва) используется 1.3 мегапиксельный ( $1280 \times 1024$ ) цветной CMOS-сенсор фирмы Micron с диагональю 19.7 мм. Увеличение частоты кадров  $\nu$  можно обеспечить путем уменьшения числа строк  $N$  вводимого изображения:  $\nu = 5 \times 10^5/N$ .

Достаточное для большинства задач число строк  $N = 100$  позволяет увеличить частоту до 5000 кадров в секунду. Объем памяти системы – более 15000 кадров.

Примеры наблюдения прикатодной плазмы и поверхности вольфрамового катода в сильноточной дуге исследуемого плазмотрона представлены на рис. 2.

Замечательным свойством системы с цветным CMOS-сенсором является возможность представления цветного изображения объекта в виде трех цифровых составляющих, соответствующих синему, зеленому и красному компонентам интегральной картины. Каждая из составляющих характеризуется паспортизированной абсолютной квантовой эффективностью, зависящей от длины волны излучения. Для улучшения цветопередачи и обрезания длинноволновых участков пропускания трех сенсорных фильтров используется дополнительный отрезающий ИК-фильтр, помещаемый на входе системы и не пропускающий излучение с длиной волны  $\lambda > 740$  нм. Для обеспечения оптимальных значений пространственного и временного разрешения был выбран режим регистрации видеоизображений, описанный ниже.

Число строк изображения – 150, число кадров –  $3000 \text{ с}^{-1}$ , время экспозиции кадра – 2 мкс, пространственное разрешение с учетом масштаба изображения и размера пикселя матрицы – 12 мкм было не хуже 30 мкм.

Возможность отображения картины свечения катода и прилегающей к нему плазмы в каждом из трех цветов – красном (R), зеленом (G) и синем (B) превращает высокоскоростную камеру VS-FAST в трехцветный микропирометр с высоким временным (порядка мкс) и пространственным (не хуже 30 мкм) разрешением. При наличии эталона яркости, излучение которого регистрируется камерой с использованием той же оптической схемы, что и исследуемый объект (известная экспозиция, апертура зоны наблюдения, диафрагма объектива), процедура определения температуры (и поля температур) поверхности катода состоит в следующем.

Поле температур на поверхности катода определяется по отношению локальной излучательной способности (яркости свечения) катода на выбранной длине волны  $\lambda'$  к излучательной способности эталонного источника на той же длине волны

$$\frac{b_k(\lambda', T_k)}{b_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} = \frac{U_k(\lambda', T_k) \epsilon_w(\lambda', T_k(x, y, z))}{\eta U_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}}) \epsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} \cong \exp\left(\frac{c_2}{\lambda'} \left(\frac{1}{T_{\text{эт}}} - \frac{1}{T_k}\right)\right) \frac{\epsilon_w(\lambda', T_k(x, y, z))}{\eta \epsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} \quad (1)$$

Заметим, что использование формулы Вина вместо закона Планка (правый член формулы) в области  $\lambda = 400\text{--}900$  нм при  $T_k^{\text{max}} = 4000$  К приводит к максимальной погрешности  $\delta T/T \approx e^{-4} \approx 0.02$ .

В выражении (1)  $b_k(\lambda', T_k(x, y, z))$  и  $b_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})$  – соответственно локальное значение яркости свечения катода за вычетом “экранирующего” плазменного излучения и яркость эталонного источника излучения с истинной температурой  $T_{\text{эт}}$ ;  $c_2 = hc/k$  – константа;  $\eta$  – коэффициент, учитываю-

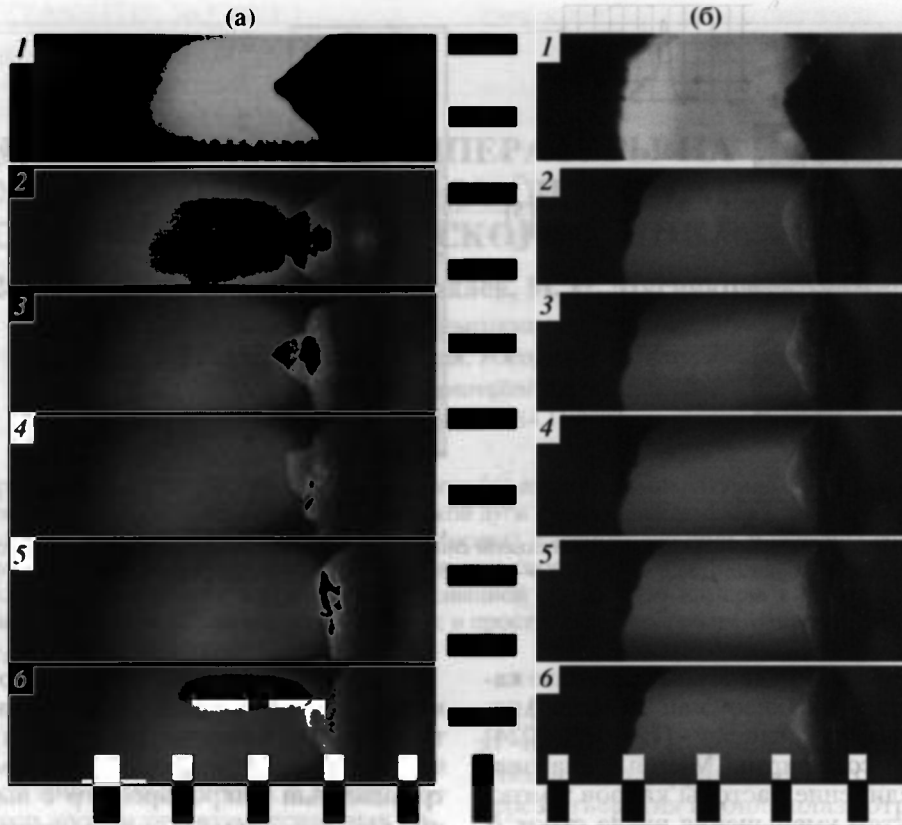


Рис. 2. Результаты видеонаблюдения за поверхностью вольфрамового катода в сильноточной дуге в азоте – (а), аргоне – (б) при токе дуги  $I = 350$  А и расходе плазмообразующего газа  $G = 1.5$  г/с: 1 – состояние катода до начала ресурсных испытаний; 2 – первая минута ресурсных испытаний; 3–6 – последовательность кадров с интервалом 15 мин (цена деления масштабной сетки 1 мм).

ший различия условий регистрации объекта и эталона;  $\epsilon_k(\lambda', T_k(x, y, z))$  и  $\epsilon_{ст}(\lambda', T_{ст})$  – степени черноты на исследуемой длине волны  $\lambda'$  поверхности катода в функции локальной температуры катода  $T_k$  и вольфрамовой лампы при ее истинной температуре  $T_{ст}$ ;  $U_k(\lambda', T_k)$ ,  $U_{ст}(\lambda', T_{ст})$  – планковские спектральные плотности энергии излучения поверхности катода и эталонной лампы на длине волны  $\lambda'$ .

Для определения коэффициента  $\eta$  строилась с использованием тест-объекта регулируемой яркости тарировочная зависимость интенсивности свечения объекта от времени экспозиции кадра видеокамеры.

В опыте регистрируются яркости свечения катода и эталона. Оцифрованное видеонаблюдение светящегося катода корректируется путем программного вычитания из наблюдаемой суммарной интенсивности свечения катода и плазмы (находящейся между катодом и наблюдателем) интенсивности излучения плазмы. Это излучение определяется экстраполяцией на область катода интенсивности свечения плазмы при  $Z > 0$  (вне катода) и  $Z < -0.5$  мм (где наблюдается свечение плазмы при практическом отсутствии свечения охлажденной части катода) – см. рис. 3. Установленные таким образом локальные интенсивности

излучения поверхности катода сравниваются с интенсивностью эталонного источника (вольфрамовой ленточной лампы) с известной яркостной температурой на пирометрической длине волны.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Локальные значения температуры поверхности катода  $T_k(x, y, z)$  могут быть определены из решения уравнения (1)

$$T_k(x, y, z) = \frac{T_{ст}}{1 - \frac{\lambda' T_{ст}}{c_2} \ln \left( \eta \frac{\epsilon_{ст}(\lambda', T_{ст}) b_k(\lambda', T_k)}{\epsilon_k(\lambda', T_k) b_{ст}(\lambda', T_{ст})} \right)} \quad (2)$$

С использованием литературных данных по зависимостям  $\epsilon_w(\lambda, T_k)$  [7–9] уравнение (2) численно решалось относительно  $T_k$ . Заметим, что “рабочая” поверхность катода после испытаний имела металлический блеск и не содержала следов окислов.

Основная проблема определения локальных значений температуры поверхности катода  $T_k(x, y, z)$  состоит в правильной экстраполяции яркости свечения плазмы на область свечения поверхности катода для соответствующих цветов (RGB). Эта процедура выполнялась программно в

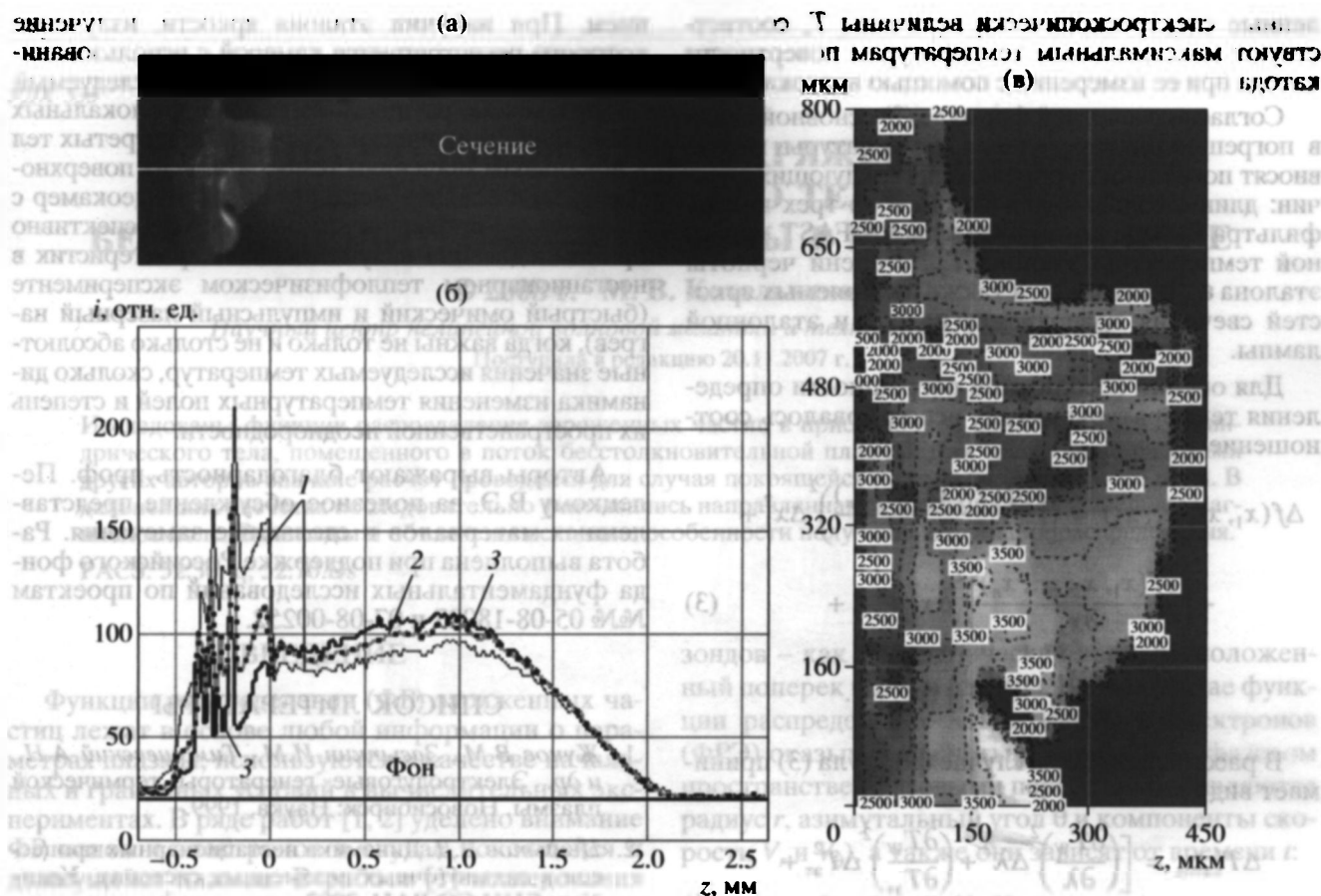


Рис. 3. Скоростная визуализация прикатодной области дуги в азоте при токе 350 А: (а) – вид свечения катода ( $Z \leq 0$ ) и плазмы ( $Z > 0$ ); (б) – разложение на три цветовых компонента (1 – красный, 2 – зеленый, 3 – синий) интенсивности свечения катода и плазмы в указанном на (а) сечении; (в) – поле температур на поверхности катода, изображенное на видеограмме (а).

среде Mathcad, и выделенная составляющая яркости свечения катода использовалась для расчета поля температур поверхности катода. При этом осуществлялось циклическое вычисление по формуле (2) температуры в каждом элементе матрицы, отображающей поверхность W-катода. Пример полученного в результате поля температур на поверхности катода по "красной" компоненте излучения приводится на рис. 3. Отметим, что области расплавленного металла на поверхности катода (каплевидный блик внизу рис. 3а) соответствует изотерма  $T \approx T_{\text{плавл}}^W = 3690$  К на рис. 3в.

Для выяснения роли излучения столба дуги, достигшего поверхности катода и отраженного от нее в направлении наблюдателя, было выполнено дополнительное исследование с использованием узкополосных интерференционных фильтров (ИТФ), значительно снижающих эту роль благодаря выбору полосы пропускания ИТФ, свободной от интенсивных спектральных линий исследуемой плазмы. Этот анализ показал, что в "красном" диапазоне использование фильтров практически не уменьшает значений температуры катода,

тогда как температуры, получаемые в зеленом и

особенно в синем диапазонах, указывают на заметный вклад отраженного света в эффективную яркость свечения катода. Данное обстоятельство в совокупности с тем фактом, что излучение столба дуги исследуемой плазмы азота и аргона в красной области спектра содержит ограниченное число линий ArI и Ni (тогда как в сине-зеленой области наблюдается "частвокол" сильных линий ArII, и NiI) [5], приводит к заключению о наибольшей надежности измерения температуры поверхности катода по "красной" компоненте излучения.

Для подтверждения пригодности описываемого метода получения полей температур с помощью скоростной видеокамеры осуществлялась синхронная с видеонаблюдениями регистрация спектров излучения зоны плазма-катод с целью определения температуры описанным выше методом многочастотной спектрометрии. При обработке спектров в области длин волн 450–1000 нм в качестве искомой определялась максимальная температура на поверхности катода. Ее значения лежат в диапазоне 3000–3700 К, при этом опреде-

ленные спектроскопически величины  $T_k$  соответствуют максимальным температурам поверхности катода при ее измерении с помощью видеокамеры.

Согласно расчетной формуле (2) основной вклад в погрешность определения температуры катода вносят погрешности определения следующих величин: длины волны  $\lambda$  для каждого из трех цветов фильтра Байера сенсора камеры VS-FAST, истинной температуры эталона  $T_{эт}$ , степени черноты эталона  $\epsilon_{эт}$  и катода  $\epsilon_k$ , а также измеряемых яркостей свечения поверхности катода и эталонной лампы.

Для оценки абсолютной погрешности определения температуры катода использовалось соотношение

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left[ \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} \right)^2 \Delta x_1^2 + \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} \right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} \right)^2 \Delta x_n^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

В рассматриваемом случае формула (3) принимает вид

$$\Delta T_{\text{катод}} = \left[ \left( \frac{\partial T_w}{\partial \lambda} \right)^2 \Delta \lambda^2 + \left( \frac{\partial T_w}{\partial T_{эт}} \right)^2 \Delta T_{эт}^2 + \left( \frac{\partial T_w}{\partial \epsilon_{эт}} \right)^2 \Delta \epsilon_{эт}^2 + \left( \frac{\partial T_w}{\partial \epsilon_k} \right)^2 \Delta \epsilon_k^2 + \left( \frac{\partial T_w}{\partial b_k} \right)^2 \Delta b_k^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Для абсолютных погрешностей величин, входящих в формулу (4), принимались следующие значения:  $\Delta \lambda = 7$  нм при использовании интерференционного фильтра и  $\Delta \lambda = 15$  нм при определении опорной длины волны без использования фильтра,  $\Delta T_{эт} = 0.03 T_{эт}$ ,  $\Delta \epsilon_{эт} = 0.05$ ,  $\Delta \epsilon_k = 0.1$ ,  $\Delta b_k = (0.15-0.25)b_k$ . Найденная таким образом абсолютная погрешность определения температуры поверхности катода составляет  $\Delta T_k \approx 250-300$  К.

С учетом вклада в наблюдаемое свечение катода как излучения плазмы, экранирующего катод, так и отраженного поверхностью катода излучения плазмы относительная погрешность определения температуры поверхности катода в диапазоне ее изменения от 3000 до 3700 К составляет в соответствии с (4) менее 10%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможность отображения картины свечения катода и прилегающей к нему плазмы в каждом из трех цветов: красном (R), зеленом (G) и синем (B) – превращает высокоскоростную камеру VS-FAST в трехдлинноволновый микропинометр с высоким временным (порядка микросекунды) и пространственным (не хуже 30 мкм) разреше-

нием. При наличии эталона яркости, излучение которого регистрируется камерой с использованием той же оптической схемы, что и исследуемый объект, можно осуществить переход от локальных значений освещенности неоднородно нагретых тел к локальным значениям температур их поверхности. Использование мегапиксельных видеокамер с высоким быстродействием особенно перспективно при исследовании излучательных характеристик в нестационарном теплофизическом эксперименте (быстрый омический и импульсный лазерный нагрев), когда важны не только и не столько абсолютные значения исследуемых температур, сколько динамика изменения температурных полей и степень их пространственной неоднородности.

Авторы выражают благодарность проф. Пелецкому В.Э. за полезное обсуждение представленных материалов и сделанные замечания. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам №№ 05-08-18027 и 07-08-00252.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.М., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999.
2. Цыдыпов Б.Д. Динамика нестационарных процессов в сильноточных плазменных системах. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2002.
3. Белевцев А.А., Горячев С.В., Исакаев Э.Х. и др. Результаты скоростной визуализации поверхности вольфрамового катода сильноточной электрической дуги // Мат. Всероссийской (с международным участием) конференции ФНТП-2007. Т. 2. С. 24.
4. Исакаев Э.Х., Григорьянц Р.Р., Спектор Н.О., Тюфтяев А.С. Влияние раскрытия канала выходного электрода на характеристики плазматрона // ТВТ. 1994. Т. 32. № 4. С. 627.
5. Белевцев А.А., Исакаев Э.Х., Маркин А.В. и др. Анализ метрологических возможностей сильноточной дуги в плазматронах с расширяющимся каналом // ТВТ. 2000. Т. 38. № 5. С. 693.
6. Исакаев Э.Х., Маркин А.В., Хаймин В.А., Чиннов В.Ф. Автоматизированная система обработки спектров излучения плазмы // Приборы и техника эксперимента. 2001. Т. 44. Вып. 1. С. 1.
7. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974.
8. Arpacı E., Bets G., Froberg M. Determination of Spectral Emissivities of Niobium, Molybdenum, Tantalum, and Tungsten at their Melting Points // High Temp. – High Press. 1985. V. 17. P. 519.
9. Babelot J.-F., Hoch M. Investigation of the Spectral Emissivity Data of Some Metals and Nonmetals in the Wavelength Range 400–15 000 nm, and of their Total Emissivity // High Temp. – High Press. 1989. V. 21. P. 79.