

УДК 536.2,536.5

## СКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ИНФОРМАТИВНОСТИ И ТОЧНОСТИ

© 2010 г. С. В. Горячев, В. Э. Пелецкий, В. Ф. Чиннов

*Объединенный институт высоких температур, Москва*

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

Поступила в редакцию 15.07.2008 г.

В нестационарном теплофизическом эксперименте определение таких свойств образца, как энтальпия, теплоемкость, удельное сопротивление, основывается на измерениях вклада электрической энергии в протяженную зону образца, выделенную контактными зондами. Если эта зона неизотермична, то установление температуры, к которой следует отнести найденные значения названных характеристик, становится трудноразрешимой проблемой. В опыте с субсекундным нагревом титанового образца в атмосфере воздуха с помощью скоростной цифровой камеры “Спринт” (ЗАО “Видеоскан”, Москва) с использованием программы преобразования картины светимости объекта в температурные поля были получены распределения яркостной температуры на поверхности образца, свидетельствующие о сильной неоднородности нагрева образца на протяжении всего эксперимента.

В работе показано, что использование средств контроля за пространственно-временным изменением температурных полей на поверхности исследуемого объекта позволяет внести определенность в оценку надежности измерения теплофизических свойств веществ, базирующихся на математических моделях идеальных тепловых процессов.

PACS: 64.70.D-

### ВВЕДЕНИЕ

Современные системы высокоскоростной фотографии и видеосъемки становятся незаменимыми средствами объективного контроля процессов, протекающих в нестационарном теплофизическом эксперименте. В настоящей работе описывается применение скоростной цифровой камеры “Спринт” в качестве дополнительного средства температурного контроля при изучении теплофизических свойств электропроводных материалов методом импульсного резистивного нагрева. Эта измерительная технология активно применяется в современных лабораториях [1–3] для изучения энтальпии, теплоемкости и электропроводности самых различных материалов. Положенная в ее основу математическая модель предполагает однородность образца и отсутствие каких-либо возмущений температурного поля, связанных с применяемыми средствами диагностики и конечной длиной образца. В зависимости от интенсивности энерговода в опытах могут быть реализованы динамические состояния со скоростями изменения температуры от  $10^2$  до  $10^9$  К/с, что позволяет изучать как равновесные свойства, так и существенно неравновесные процессы.

Вместе с тем при практической реализации данной методики приходится считаться с возможным влиянием ряда факторов, нарушающих однородность нагрева и, следовательно, ведущих к неопределенности измеряемых характеристик. Важнейшими из этих факторов являются: отвод тепла к холодным токоподводящим электродам [4]; отвод тепла к потенциальным зондам, с помощью которых выделяется контролируемый участок образца и измеряется падение напряжения на нем; перераспределение плотности греющего тока в окрестности пирометрических отверстий в образце. Названные факторы нарушают основную посылку метода – предположение об однородности нагрева. Оценка же корректирующих поправок на влияние этих факторов требует сведений о температурном поле образца в зонах ожидаемых возмущений. Традиционная (одноточечная) пирометрия эту задачу не решает. Нужны тепловизионные системы, к классу которых, в частности, можно отнести и используемую нами высокоскоростную видеокамеру “Спринт”.

Ее возможности продемонстрированы ниже в эксперименте по нагреву образца, в котором вследствие технологии его изготовления можно было ожидать неоднородный нагрев. Таким образом, первой задачей эксперимента является про-

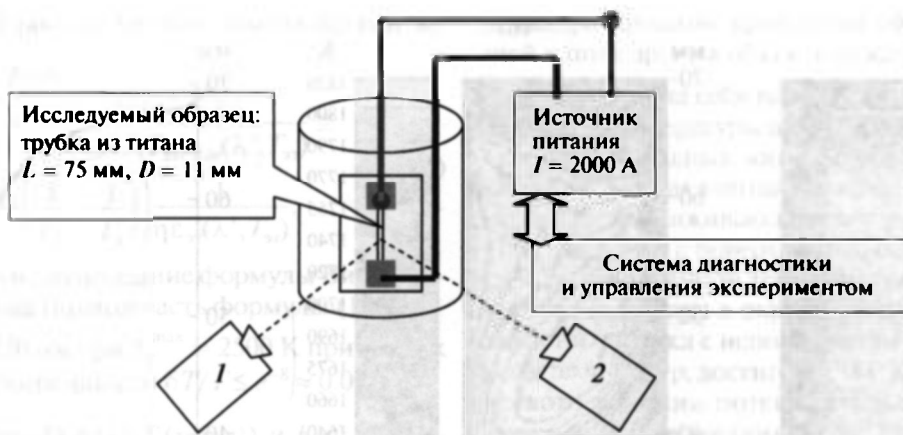


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – высокоскоростная камера “Спринт” с экспозицией кадра 80 мкс и частотой кадров 700 с<sup>-1</sup>, 2 – высокоточный монохроматический пирометр. Пространственное разрешение видеокамеры – 50 мкм.

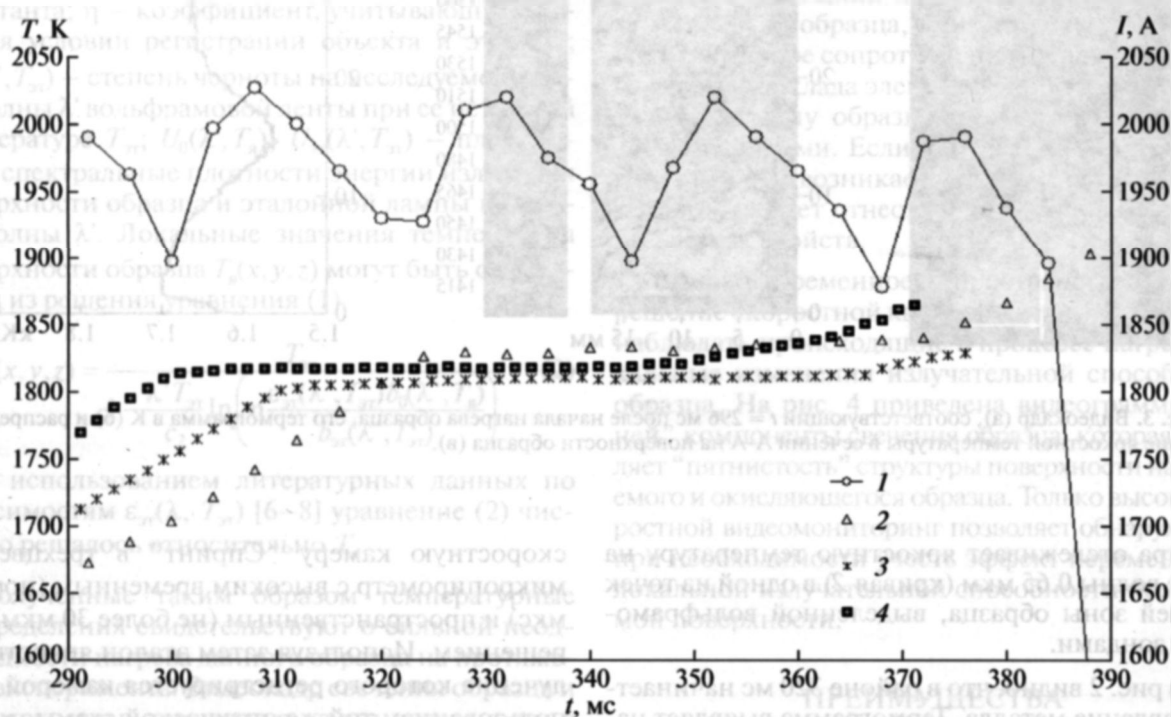


Рис. 2. Исследованные временные характеристики: 1 – изменение греющего тока в амперах, протекающего через образец; 2 – термограмма зоны визирования, полученная с помощью пирометра (точка 3 на рис. 3а); 3, 4 – термограммы двух областей неоднородно нагреваемого образца (точка 1 и 2 на рис. 3а).

верка степени пригодности образцов выбранной партии для измерений их теплофизических и электрофизических характеристик. Кроме того, хотелось бы установить роль “захолаживающего” влияния потенциальных зондов. Наконец, с учетом планируемых экспериментов по изучению роли окисления металла в процессе его нагрева в воздушной среде следовало бы проверить возможность наблюдения динамики нарастания оксидного слоя на поверхности титанового образца.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Трубчатый образец технического титана общей длиной 75 мм и диаметрами 11/10 мм нагревался импульсом электрического тока ~2000 А. Нагрев производился в воздушной среде. На рис. 2 показана диаграмма контролируемых в опыте параметров. Видно, что ввод электрической энергии в образец прерывается в районе 385 мс (кривая тока *I*), сигнал оптического пи-

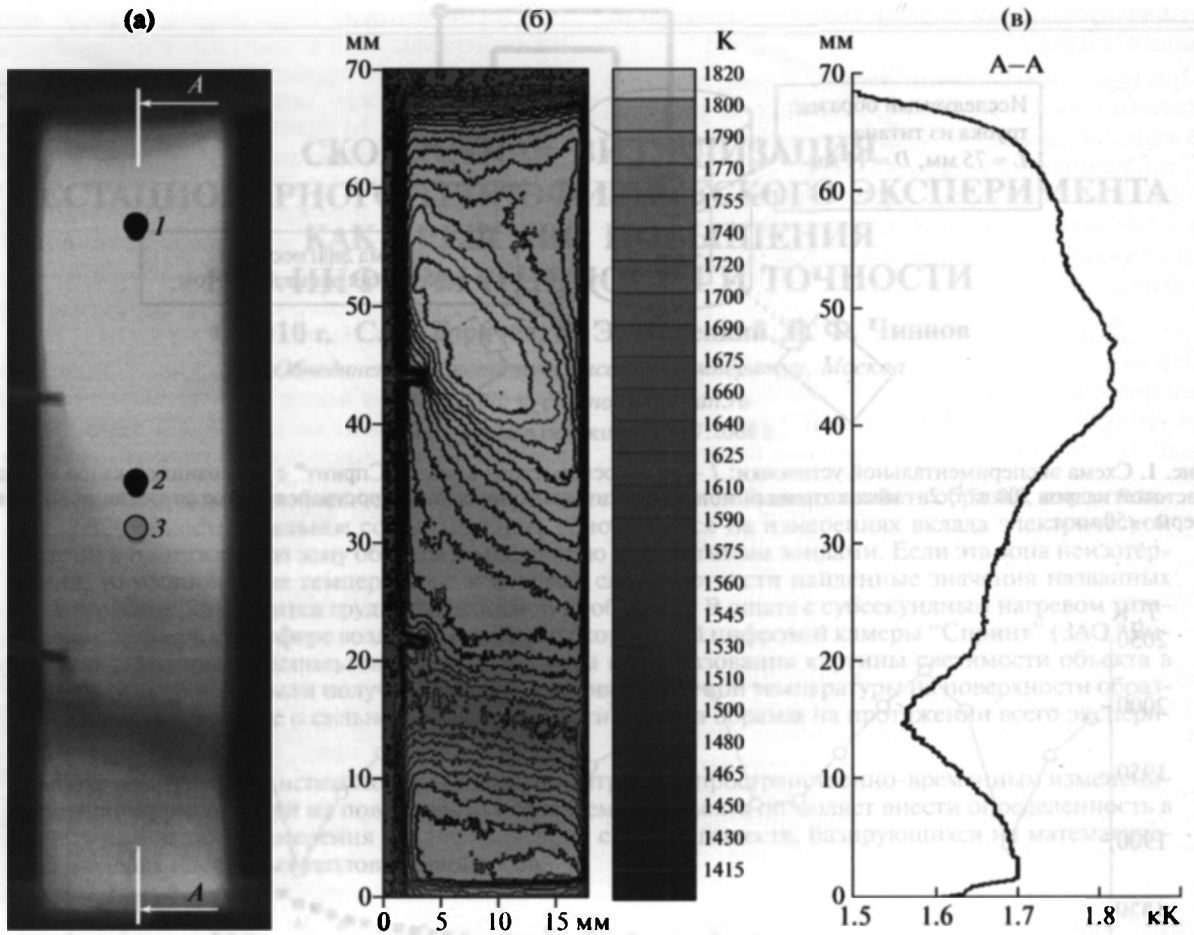


Рис. 3. Видеокадр (а), соответствующий  $t = 296$  мс после начала нагрева образца, его термограмма в К (б) и распределение яркостной температуры в сечении А-А на поверхности образца (в).

рометра отслеживает яркостную температуру на длине волны 0.65 мкм (кривая 2) в одной из точек рабочей зоны образца, выделенной вольфрамовыми зондами.

Из рис. 2 видно, что в районе 320 мс начинается плавление металла. Термограмма выявляет наступающий после 370 мс перегрев расплавленного металла (см. кривую 2). Подъем температуры непрерывно продолжается и после прерывания тока (на 385–400 мс, ср. кривые 1 и 2), что можно объяснить эффектом выделения тепла вследствие горения титана в воздушной среде. Этот процесс постепенно прекращается из-за формирования оксидного слоя, препятствующего доступу кислорода к металлу. Подчеркнем, что термограмма относится к пространственной области размером 1.5–2 мм (к пятну визирования пирометра), отмеченной цифрой 3 на рис. 3.

Возможность отображения картины свечения образца в каждом из трех цветов – красном (R), зеленом (G), синем (B) – превращает высоко-

скоростную камеру “Спринт” в трехцветный микропирометр с высоким временным (порядка мкс) и пространственным (не более 30 мкм) разрешением. Используя затем эталон яркости, излучение которого регистрируется камерой с использованием той же оптической схемы, можно осуществить переход от локальных значений интенсивности излучения неоднородно нагретого тела к локальным значениям яркостной температуры его поверхности. С использованием оцифрованных видеокадров высокоскоростной камеры и программы преобразования картины светимости объекта в температурные поля [5] были получены распределения яркостной температуры на поверхности образца в течение всего периода его нагрева. Температура на поверхности образца определяется по отношению локальной яркости свечения образца на “характеристической” длине волны  $\lambda$  (красной, зеленой, синей) к яркости эталонного источника – градуирован-

ной ленточной вольфрамовой лампы на той же длине волны:

$$\frac{b_0(\lambda', T_{\text{я}})}{b_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} = \frac{U_0(\lambda', T_{\text{я}})}{\eta \cdot U_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}}) \varepsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} \cong \exp\left(\frac{c_2}{\lambda'} \left(\frac{1}{T_{\text{эт}}} - \frac{1}{T_{\text{я}}}\right)\right) \frac{1}{\eta \varepsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})} \quad (1)$$

Заметим, что использование формулы Вина вместо закона Планка (правая часть формулы (1)) в области  $\lambda = 450\text{--}750$  нм при  $T_{\text{я}}^{\text{max}} = 2500$  К приводит к максимальной погрешности  $\delta T/T \leq e^{-8} \approx 0.001$ .

В выражении (1)  $b_0(\lambda', T_{\text{я}}(x, y, z))$  и  $b_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})$  — соответственно локальное значение яркости свечения титановой трубки с яркостной температурой  $T_{\text{я}}$  и яркость эталонного источника излучения с известной истинной температурой  $T_{\text{эт}}$ ;  $c_2 = hc/k$  — константа;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий различия условий регистрации объекта и эталона;  $\varepsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})$  — степень черноты на исследуемой длине волны  $\lambda'$  вольфрамовой ленты при ее истинной температуре  $T_{\text{эт}}$ ;  $U_0(\lambda', T_{\text{я}})$ ,  $U_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})$  — планковские спектральные плотности энергии излучения поверхности образца и эталонной лампы на длине волны  $\lambda'$ . Локальные значения температуры поверхности образца  $T_{\text{я}}(x, y, z)$  могут быть определены из решения уравнения (1)

$$T_{\text{я}}(x, y, z) = \frac{T_{\text{эт}}}{1 - \frac{\lambda' T_{\text{эт}}}{c_2} \ln\left(\frac{\eta \varepsilon_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}}) b_0(\lambda', T_{\text{я}})}{b_{\text{эт}}(\lambda', T_{\text{эт}})}\right)} \quad (2)$$

С использованием литературных данных по зависимостям  $\varepsilon_{\text{эт}}(\lambda, T_{\text{эт}})$  [6–8] уравнение (2) численно решалось относительно  $T_{\text{я}}$ .

Полученные таким образом температурные распределения свидетельствуют о сильной неоднородности нагрева данного образца на протяжении эксперимента. Видеокадр свечения образца и поле яркостных температур на его поверхности в момент времени, соответствующий началу плавления образца ( $t = 296$  мс), представлены на рис. 3. Здесь отчетливо видна спиралевидная неоднородность нагрева образца. Ее причиной, по-видимому, явилась технология изготовления титановой трубки методом винтовой сварки полосы, что вызвало неоднородность проводящих свойств образца и его винтообразный перегрев. Это сформировало зону локального перегрева в окрестности верхнего токовода, и последующее наблюдаемое в эксперименте разрушение образца [9] началось в области именно этого локального перегрева. Минимум температуры в нижней части образца не связан с неоднородностью температурного поля, а вызван экранировкой части ви-

деокадра штангой крепления образца, попадающей в поле зрения объектива камеры.

Обращают на себя внимание локальные неоднородности температуры в зонах контакта вольфрамовых потенциальных зондов с образцом. Как видно на рис. 3, в зонах контакта зондов с образцом выявляется их захлаживающее действие. В окрестности контакта зонда с поверхностью образца формируется поле пониженной температуры, при этом градиенты температуры в окрестности зондов, как показывает их оценка с использованием оцифрованного поля температур, достигают 2000 К/см. Зона термического влияния потенциальных зондов составляет несколько миллиметров. Ее наличие приводит к нарушению однородности температурного поля при нагреве образца и к необходимости введения поправок при программной обработке эксперимента с использованием пирометрических данных и показаний потенциальных зондов. Такие свойства образца, как энтальпия, теплоемкость, удельное сопротивление, основываются на измерениях вклада электрической энергии в протяженную зону образца, выделенную потенциальными иглами. Если эта зона существенно не изотермична, возникает вопрос о температуре, к которой следует отнести рассчитанные значения названных свойств.

Высокое временное и пространственное разрешение скоростной камеры “Спринт” позволяет наблюдать происходящие в процессе нагрева локальные изменения излучательной способности образца. На рис. 4 приведена видеограмма “синей” компоненты свечения образца, которая выявляет “пятнистость” структуры поверхности нагреваемого и окисляющегося образца. Только высокоскоростной видеомониторинг позволяет обнаружить и при необходимости учесть эффект переменности локальной излучательной способности исследуемой поверхности.

### ПРЕИМУЩЕСТВА СКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Введение в состав диагностических средств системы регистрации температурных полей является принципиально важным: ее использование помогает решить вопрос о применимости методов численного моделирования идеальных тепловых процессов для интерпретации экспериментальных данных и оценки их погрешности.

Новые возможности открывает трехцветная скоростная визуализация и при исследовании таких важнейших физических явлений, как структурная перестройка металла. В данном случае речь идет о полиморфном превращении титана (переход  $\alpha \rightarrow \beta$ ), происходящем в интервале температур 1200–1300 К, и фазовом переходе “соли-

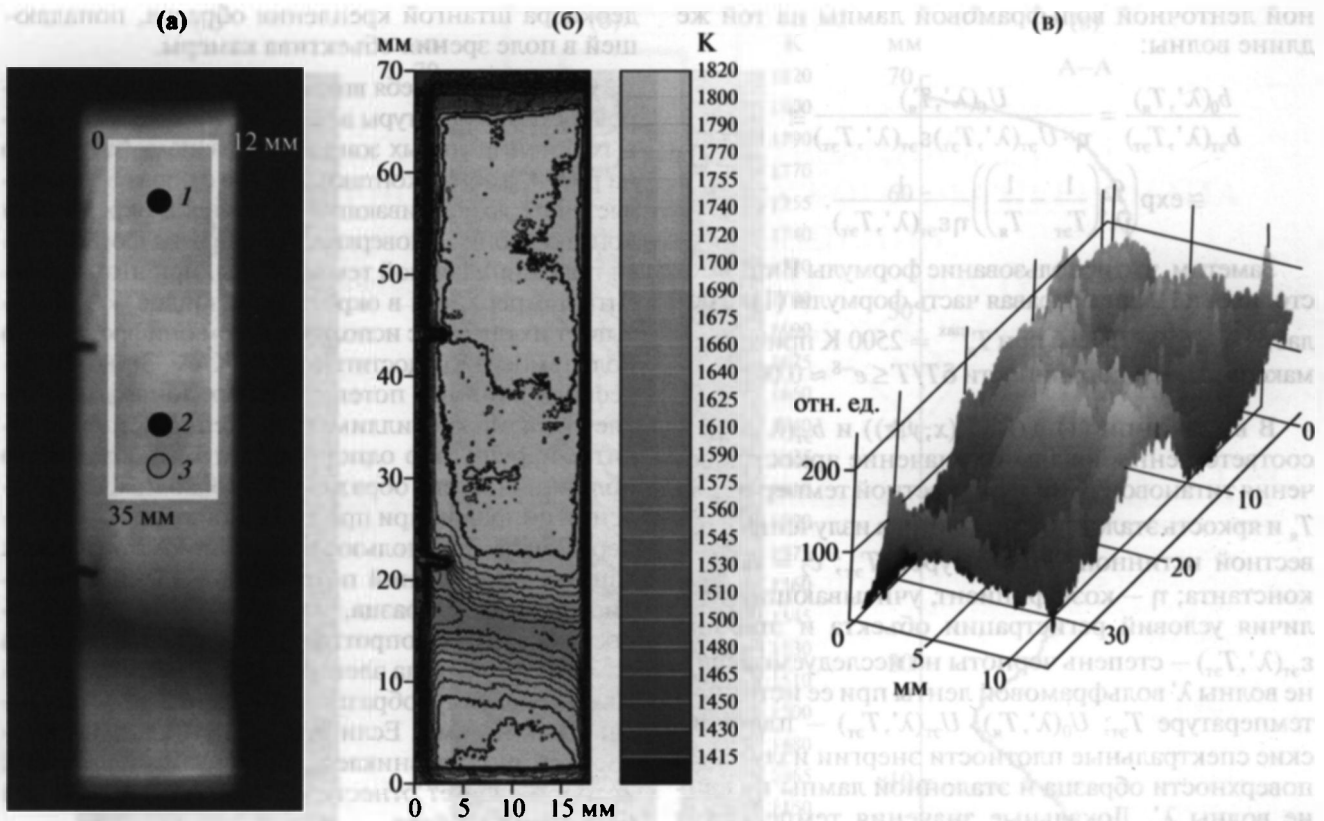


Рис. 4. Видеокادر свечения образца (а), соответствующий  $t = 333$  мс после начала нагрева образца, термограмма его поверхности в К (б) и увеличенный “рельеф” интенсивности излучения выделенного слева участка поверхности образца (в).

дус–ликвидус”. На рис. 2 выполнено сопоставление термограммы процесса нагрева центральной зоны образца (кривая 2), с динамикой светимости двух областей неоднородно нагреваемого образца (обозначенных на рис. 3 точками 1 и 2). Это сопоставление указывает на то, что фазовый переход в нагреваемом образце надежно регистрируется. Отметим, что интервалы времен перехода “солидус–ликвидус” на кривых 2–4 (рис. 2), относящихся к разным точкам центральной зоны образца, практически, с точностью 5–7%, совпадают.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, важнейшим результатом применения камеры “Спринт” в данном нестационарном эксперименте является вывод о невозможности без скоростной визуализации судить о корректности теплофизических измерений, базирующихся на идеализированных моделях описания тепловых процессов в образце. Проведенное исследование показывает, что даже самый тщательный выбор образца и его подготовка к испытанию не устанавливают априори его пригодности для исследования тех или иных теплофизических свойств материала, опирающегося на предполо-

жение о его однородном нагреве. Только видеомониторинг свечения поверхности образца в процессе его нагрева может ответить на вопрос об адекватности модели процесса его реализации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 07-08-00252 и 07-08-00708).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maglic K.D., Pavicic D.Z. Thermal and Electrical Properties of Titanium between 300 and 1900 K // Int. J. Thermophys. 2001. V. 22 № 6. P. 1833.
2. Kaschnitz E., Reiter P. Heat Capacity of Titanium in the Temperature Range 1500 to 1900 K Measured by a Millisecond Pulse-heating Technique // J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2001. V. 64. P. 351.
3. Петрова И.И., Пелецкий В.Э., Самсонов Б.Н. Исследование теплофизических свойств циркония методом субсекундного импульсного нагрева // ТВТ. 2000. Т. 38. № 4. С. 584.
4. Пелецкий В.Э. Неизотермичность образца в режимах импульсного электрического нагрева // ТВТ. 1999. Т. 37. № 1. С. 128.
5. Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Мясников М.И., Чиннов В.Ф. Исследование полей температуры на поверхности вольфрамового катода сильноточной

- дути с помощью высокоскоростной матрицы // ТВТ. 2008. Т. 46. № 6. С. 820.
6. Излучательные свойства твердых материалов. Спр. / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974.
  7. *Arpaci E., Bets G., Froberg M.* Determination of Spectral Emissivities of Niobium, Molybdenium, Tantalum, and Tungsten at Their Melting Points // High Temp.—High Press. 1985. V. 17. P. 519.
  8. *Babelot J.-F., Hoch M.* Investigation of the Spectral Emissivity Data of Some Metals and Nonmetals in the Wavelength Range 400–15000 nm, and of Their Total Emissivity // High Temp.—High Press. 1989. V. 21. P. 79.
  9. *Горячев С.В., Пелецкий В.Э., Чиннов В.Ф., Шур Б.А.* Исследование динамики субсекундного омического нагрева и разрушения титанового трубчатого образца // Теплофизические свойства веществ и материалов. Тр. XII Рос. конф. по теплофизическим свойствам веществ. М.: Интерконтакт, Наука, 2009. С. 29.