

## ПИРОМЕТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ П.З.С.-КАМЕР

© 2013 г. В. Е. Мошаров, В. Н. Радченко, И. В. Сенюев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Россия, 140180, Жуковский Московской обл., ул. Жуковского, 1

E-mail: mera@tsagi.ru

Поступила в редакцию 30.07.2012 г.

Описана методика измерения распределения яркостной температуры поверхности моделей в тепловых аэродинамических трубах с помощью п.з.с.-камер. Рассматриваются вопросы выбора рабочей длины волны, метрологии п.з.с.-камеры, градуировки камеры по черному телу и температурным лампам, а также возможность использования светодиодного калибра для учета пропускания измерительного тракта. Для обоснования яркостной пирометрии и оценки излучательной способности предлагается измерять спектр излучения исследуемой поверхности.

DOI: 10.7868/S0032816213030245

### ОСОБЕННОСТИ ПИРОМЕТРИИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В тепловых аэродинамических трубах требуется измерять температуру поверхности модели в диапазоне до 2000°C. Эта задача решается с помощью пирометрии – измерения собственного равновесного теплового излучения объекта исследования в видимой или ближней и.к.-области спектра.

Сложность оптического измерения температуры в аэродинамических установках связана, во-первых, с поглощением излучения исследуемого объекта окнами и зеркалами оптического тракта и их загрязнением в процессе испытания и, во-вторых, с наложением излучения окружающего газа и излучения от подогревателя из форкамеры аэродинамической трубы. Внешняя подсветка, как правило, ограничивает минимальную температуру, которая может быть измерена с помощью пирометрии.

При пирометрии используются относительные измерения, когда рабочий эталонный источник излучения, яркостная температура которого задана, сравнивается с излучением объекта. Для этого вместо модели устанавливается эталонное тело, и его излучение регистрируется через оптическую систему последовательно с излучением модели. Обычно в качестве эталонного тела используются температурные лампы типа СИ (СИ6-100, СИ8-200, СИ10-300), для которых известна зависимость яркостной температуры от тока через тело накала. Габариты этих ламп позволяют в ряде аэродинамических установок размещать их в месте установки модели. Зависимость яркостной температуры таких ламп от тока градуируется на длине волны  $\lambda = 650$  нм в ФГУП “Ростест-Москва”. Пересчет данных градуировки эталон-

ной лампы на другую длину волны (в случае необходимости) проводится с помощью хорошо известных таблиц распределения излучательной способности вольфрама по длинам волн [1].

В аэродинамическом эксперименте интерес представляет измерение распределения температуры на поверхности исследуемых моделей, для чего необходимо измерять распределение интенсивности свечения модели. Традиционно чувствительным элементом в панорамных пирометрах была фотопленка. Однако п.з.с.-камеры позволяют существенно улучшить характеристики пирометрии.

### П.З.С.-КАМЕРА КАК ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

П.з.с.-камеры значительно точнее фотопленки и в сочетании с компьютером позволяют получать информацию о температуре исследуемого объекта непосредственно во время эксперимента. Необходимо отметить, что для измерения интенсивности света надо использовать именно п.з.с.-камеры, а не к.м.о.п., точность которых ниже.

В отличие от фотопленки п.з.с.-камеры линейны (если только количество накопленных фотоэлектронов не приближается к предельной емкости пикселей), но пиксели матрицы могут отличаться чувствительностью.

Метрология п.з.с.-камеры (в сборе с приемным объективом) включает в себя:

– определение линейного диапазона чувствительности камеры;

– исправление разброса чувствительности матрицы (разброс чувствительности пикселей и виньетирование объектива);

– коррекцию дисторсии объектива.

Виньетирование и дисторсия объектива, естественно, присущи и пирометру с фоторегистрацией, но до их исправления дело, как правило, не доходило.

Линейность (порог линейности) определяется путем регистрации света стабильного источника с различными экспозициями. Линейность п.з.с.-камер упрощает работу с ними и обеспечивает высокую точность измерений, но ограничивает динамический диапазон. Возможность оперативно менять экспозицию в п.з.с.-камере и задавать ее с высокой точностью позволяет работать при оптимальных сигналах и не использовать нейтральные фильтры.

Разброс чувствительности пикселей п.з.с.-матрицы и виньетирование учитываются нормировкой всех изображений на изображение “равномерного поля”. “Равномерное поле” создается следующим образом: перед объективом устанавливается молочное стекло, которое освещается лампой накаливания через матовый экран. Полученное поле регистрируется камерой. Пример распределения интенсивности вдоль диагонали изображения “равномерного поля” представлен на рис. 1.

Коррекция дисторсии осуществляется путем регистрации эталонного объекта – экрана с контрастными точками, координаты которых точно известны (например, сетка маркеров с известным шагом). Для учета дисторсии можно использовать следующую модель:

$$r_d = b_0 r + b_3 r^3;$$

где  $r$  – исходный неискаженный радиус пиксела относительно центра дисторсии ( $x_{d0}, y_{d0}$ );  $r_d$  – искаженный радиус пиксела;  $b_0$  и  $b_3$  – коэффициенты дисторсии.

Исправление дисторсии необходимо для геометрически неискаженного представления результатов.

### ВЫБОР РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПИРОМЕТРА

Выбор рабочей длины волны пирометра обусловлен следующими факторами.

– Смещение в и.к.-область позволяет измерять более низкие температуры, так как интенсивность собственного излучения растет с увеличением длины волны, но надо иметь в виду, что чувствительность п.з.с.-матриц ограничена длиной волны ~1 мкм.

– Большинство тел серые в и.к.-области и цветные (излучательная способность или степень черноты зависит от длины волны излучения  $\varepsilon = f(\lambda)$ ) в видимой области спектра.

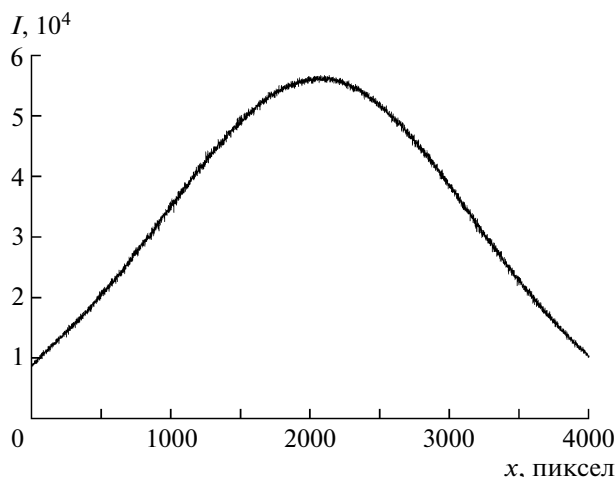


Рис. 1. Распределение интенсивности равномерного поля по диагонали п.з.с.-камеры VS-СТТ-11002 (ЗАО “НПК Видеоскан”).

– С другой стороны, смещение в и.к.-область увеличивает влияние степени черноты  $\varepsilon$  на определение истинной температуры. Дифференцирование формулы Планка в приближении Вина дает выражение, из которого следует, что ошибка вычисления температуры связана с ошибкой определения  $\varepsilon$  как

$$\frac{dT}{T} = -\frac{\lambda k T}{hc} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon},$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $c$  – скорость света;  $h$  – постоянная Планка.

– На выбор рабочей длины волны может оказать решающее влияние спектр подсветки. Отдельные яркие линии, присутствующие в спектре подогревателя, могут существенно исказить измеряемую яркостную температуру при неудачном выборе длины волны, поэтому измерение собственного спектра аэродинамической установки перед выбором рабочей длины волны – обязательная процедура.

На рис. 2 представлены спектры двух различных подогревателей, используемых в тепловых аэродинамических трубах: электродугового и с.в.ч. Если спектр электродугового подогревателя носит ярко выраженный тепловой характер с температурой ~5000 К, то спектр с.в.ч.-подогревателя состоит из отдельных линий и не имеет тепловой компоненты. Подогреватель с.в.ч. работает на частоте 1.76 МГц и имеет электрическую мощность 240 кВт [2].

### СВЕТОДИОДНЫЙ КАЛИБР ЯРКОСТИ

Отдельной проблемой в настоящее время становится прекращение выпуска температурных

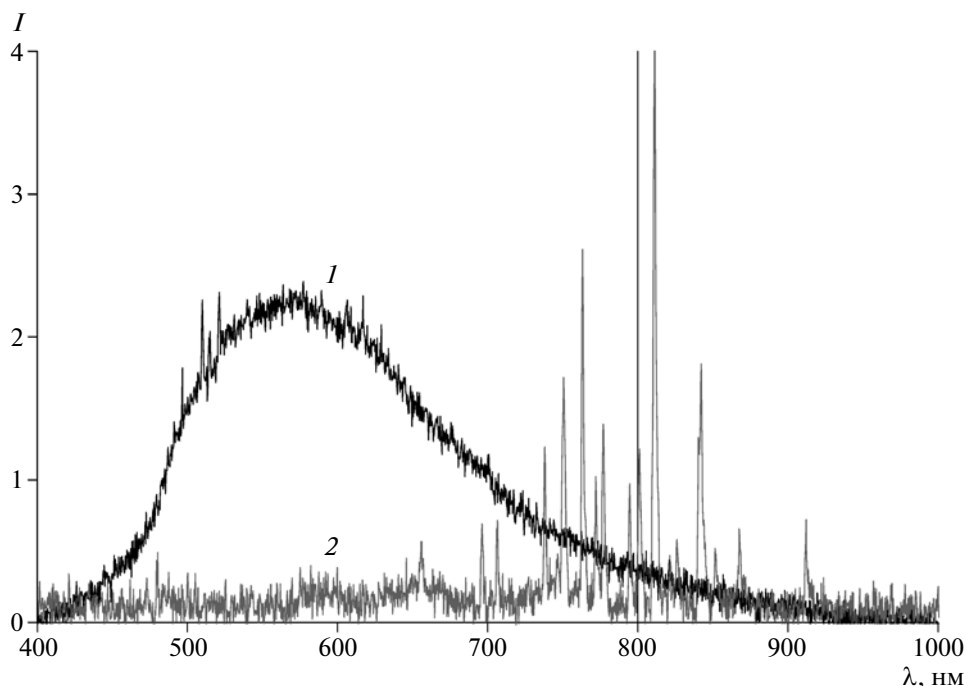


Рис. 2. Спектры подогревателей: 1 – электродугового (воздух), 2 – с.в.ч. (воздух + аргон).

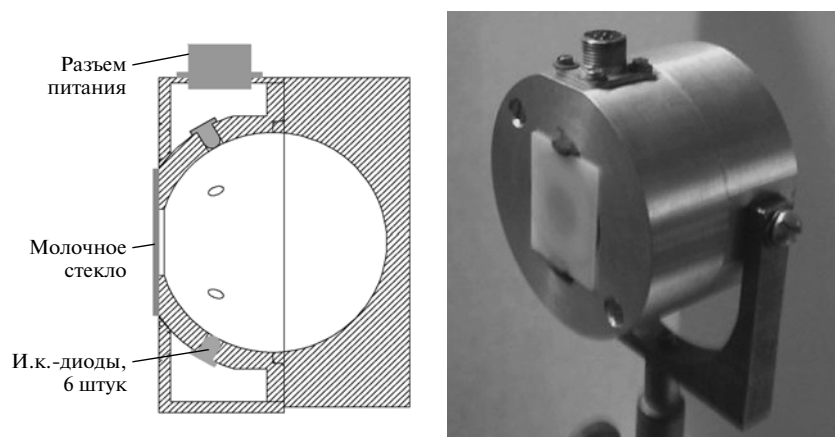


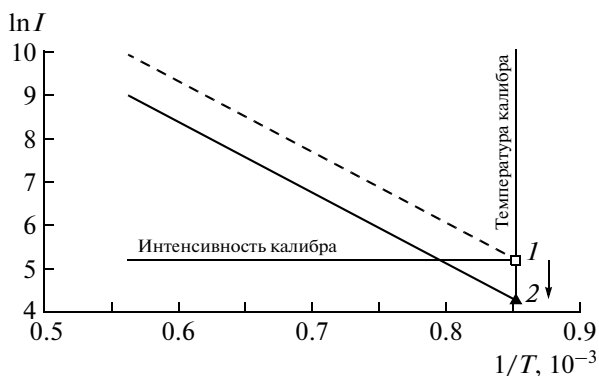
Рис. 3. Схема (слева) и внешний вид (справа) светодиодного калибра яркости.

ламп отечественной промышленности. Вместо них предлагается широкий спектр моделей черного тела, работающих в различных температурных диапазонах. Эти эталоны могут использоваться в стационарных метрологических установках, но их затруднительно использовать в аэродинамических трубах вследствие больших габаритов, веса и значительной энергетической мощности.

Для решения этой проблемы нами был разработан светодиодный калибр яркости [3]. Калибр представляет собой замкнутую полость – сферу  $\varnothing 40$  мм с отверстием  $\varnothing 12$  мм, которое закрыто молочным стеклом, являющимся эталонной по-

верхностью. Полость сферы освещается шестью светодиодами, расположенными так, чтобы их излучение не попадало напрямую в отверстие. Питание светодиодов осуществляется стабилизированным источником тока. Схема и внешний вид калибра представлены на рис. 3.

В калибре использованы светодиоды с длиной волны излучения 890 нм. На эту длину волны были изготовлены интерференционные светофильтры для п.з.с.-камер. Исследование спектров электродугового и с.в.ч.-подогревателей (см. рис. 2) показало, что эту длину волны можно использовать для измерения яркостной температуры.



**Рис. 4.** Градуировка п.з.с.-камеры и ее коррекция в условиях аэродинамической установки. Штриховая линия — лабораторная градуировочная характеристика; сплошная линия — скорректированная градуировочная характеристика;  $I$ ,  $2$  — интенсивность калибра в лаборатории и аэродинамической установке соответственно.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

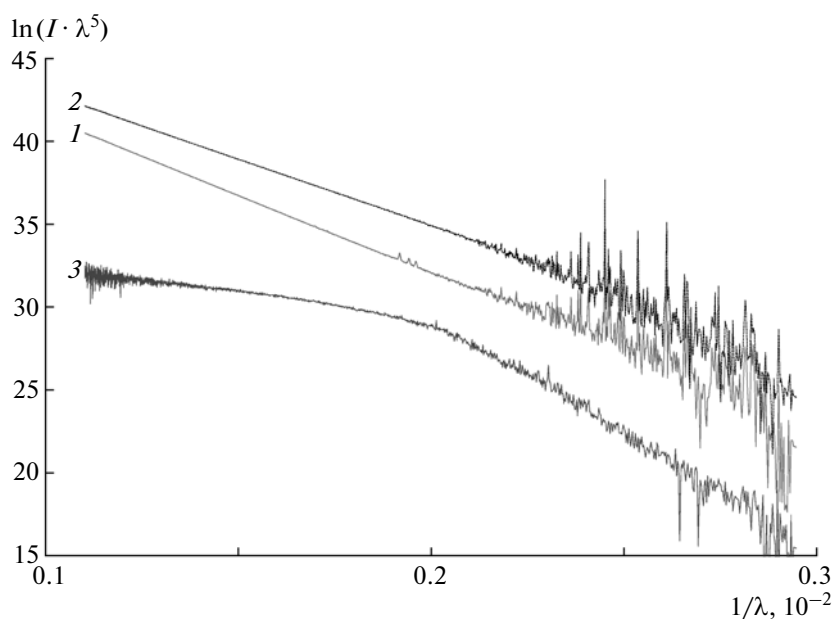
Методика измерения яркостной температуры следующая. По “черному телу” градуируется п.з.с.-камера с объективом при фиксированной диафрагме. При градуировке не изменяются ни диафрагма, ни настройка резкости, управляется только экспозиция. При тех же настройках объектива проводится калибровка камеры по равномерному полю, которая учитывается при обработке всех лабораторных измерений. Далее регистрируется излучение калибра яркости и определяется

эквивалентная яркостная температура калибра (для нашего калибра она оказалась равной  $710^{\circ}\text{C}$ ).

В аэродинамической установке камера настраивается на модель, и фиксируются настройки объектива. Вновь проводится калибровка камеры по равномерному полю. Затем калибр помещается на место исследуемой поверхности модели, и проводится коррекция градуировочной характеристики пирометра на пропускание оптического тракта. Процесс коррекции градуировки отображен на рис. 4.

Для исправления дисторсии регистрируется изображение эталонного объекта, помещенного на место модели, определяются коэффициенты дисторсии и с их помощью корректируются итоговые изображения.

Для увеличения динамического диапазона пирометра измерения начинают при больших экспозициях, позволяющих измерять температуру с  $600^{\circ}\text{C}$ . В процессе эксперимента, по мере прогрева модели, экспозиция п.з.с.-камеры уменьшается для предотвращения насыщения камеры и обеспечения работы на линейном участке, при этом ведется протокол изменения экспозиции. В процессе обработки сигнал камеры делится на соответствующую экспозицию для определения интенсивности излучения. Из полученной интенсивности по калибровочной характеристике, скорректированной по калибру яркости, определяется температура в каждой точке поверхности модели.



**Рис. 5.** Спектры свечения поверхности модели в координатах Вина для температур  $1200^{\circ}\text{C}$  ( $1$ ) и  $1500^{\circ}\text{C}$  ( $2$ ) и спектр подсветки от электродугового подогревателя на холодной модели ( $3$ ).

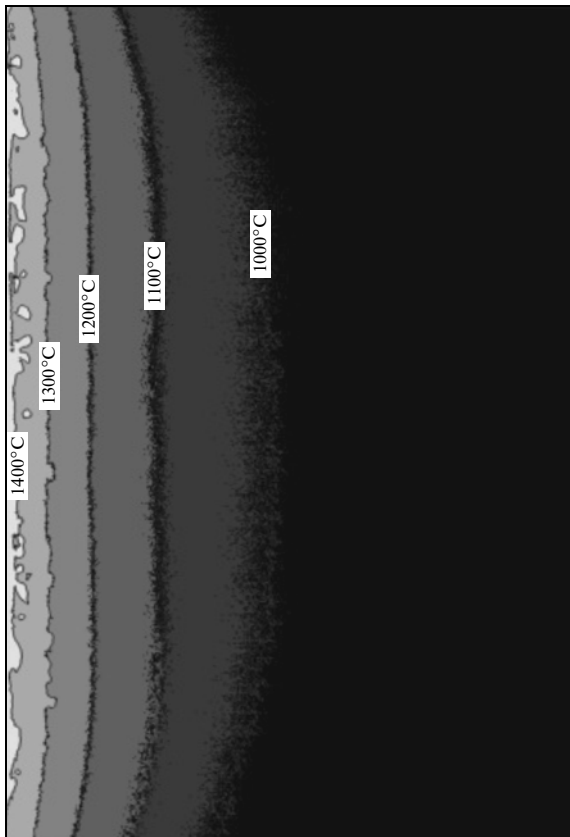


Рис. 6. Изотермы на поверхности модели элемента летательного аппарата (поток слева—направо).

### ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Работы по измерению цветовой температуры интенсивно велись в ЦАГИ 25–30 лет назад [4]. Оказалось, что температура, определяемая по интенсивностям на двух длинах волн, чрезвычайно чувствительна к внешней подсветке. Кроме того, всегда остается сомнение в степени “серости” тела на выбранных длинах волн.

Появление спектрометров с регистрацией спектра при помощи п.з.с.-линеек позволяет надеяться на прогресс в измерении цветовой, а точнее, спектральной температуры. Имея в распоряжении весь спектр, а не набор двух-трех интенсивностей при фиксированных длинах волн, можно корректно выбрать спектральный участок измерения и оценить выполнение гипотезы о “серости” тела.

Примеры спектров излучения модели, полученных в аэродинамических трубах с электродуговым подогревателем в координатах Вина ( $\ln(I\lambda^5)$ ,  $1/T$ ) для двух температур поверхности исследуемой модели, приведены на рис. 5. В этих координатах спектр серого тела представляется прямой линией, наклон которой обратно пропорционален

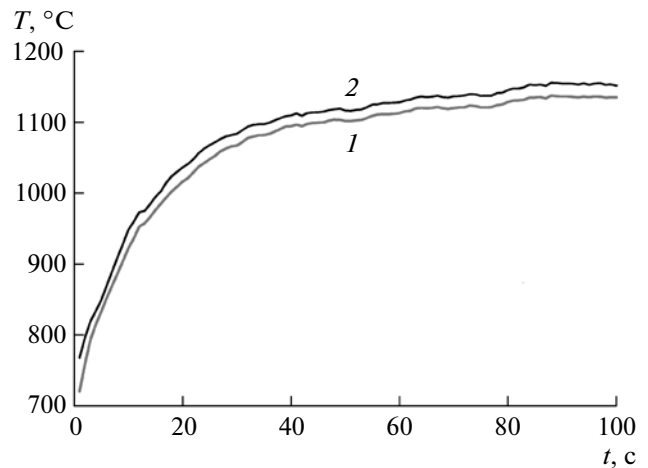


Рис. 7. Изменение яркостной (1) и спектральной температуры (2) поверхности модели элемента летательного аппарата с течением времени.

температуре и не зависит от излучательной способности, что позволяет определить спектральную температуру тела  $T_s$ . Если же спектр не аппроксимируется прямой, то тело нельзя считать серым. Однако линейность спектра в координатах Вина не гарантирует того, что тело является серым. Гипотеза “серости” должна подтверждаться независимыми методами.

На рис. 5 представлен спектр, полученный в первый момент после ввода модели в поток, когда поверхность модели еще не прогрелась и она отражает излучение электродугового подогревателя, проникающее из форкамеры аэродинамической трубы.

Из рисунка следует, что подсветка от подогревателя пренебрежимо мала по сравнению с собственным излучением модели. Выбор рабочей длины волны пирометра 890 нм корректен. Линейность спектров позволяет надеяться, что исследуемую модель можно считать серым телом, что было независимо подтверждено измерением спектров поглощения образцов на спектрофотометре при комнатной температуре.

Дополнительным преимуществом регистрации широкого спектра излучения является то, что при проведении традиционной пирометрии — яркостной (на одной длине волны) или цветовой (на двух длинах волн) — возможно перекрытие полосы фотоприемника со спектральными линиями излучающего газа, при этом неизбежны ошибки. В случае, когда визуально наблюдается спектр излучения объекта, участки со спектральными линиями или полосами легко исключить из дальнейшего анализа.

Если провести абсолютную градуировку спектрометра по черному телу, то наряду со спектраль-

ной температурой можно получить яркостную  $T_{я}$  для каждой длины волны, а из отношения испускательных способностей  $u_0(\lambda, T)$  тела при  $T_{я}$  и  $T_s$  – излучательную способность (степень черноты) исследуемого тела:

$$\varepsilon(\lambda, T_s) = u_0(\lambda, T_{я})/u_0(\lambda, T_s).$$

Измерение вариации  $\varepsilon$  во время испытания представляет самостоятельный интерес. А знание степени черноты хотя бы в одной точке исследуемой поверхности позволяет сделать шаг от яркостной температуры к истинной.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ЦАГИ проведены исследования по измерению температуры поверхности моделей в тепловой аэродинамической трубе с электродуговым подогревателем. Основным средством измерения был яркостный пирометр на основе п.з.с.-камеры. Измерения проводились с частотой 1 Гц. Продолжительность “пуска” аэродинамической трубы составляла ~100 с. Яркостный пирометр обеспечил измерение распределения яркостной температуры по поверхности модели. Излучательная способность образцов поверхности измерялась спектрофотометром с фотометрическим шаром при комнатной температуре, полученные значения использовались для вычисления истинной температуры модели. На рис. 6 представлен пример моментального распределения истинной температуры на поверхности модели, полученного в эксперименте (поток слева–направо).

Наряду с яркостным пирометром, использовался спектрометр, который регистрировал спектр свечения в одной выбранной точке поверхности. Анализ зарегистрированных спектров позволил определить спектральную температуру поверхности в выбранной точке (рис. 7). Абсолютная калибровка спектрометра по черному телу, проведенная в лаборатории, позволила определить и яркостную температуру в этой же точке поверхности. На рис. 7, наряду со спектральной температурой, показано изменение яркостной температуры на длине волны 890 нм в течение эксперимента. Одновременное измерение спектральной и яркостной температур позволило определить излучательную способность объекта в выбранной точке модели (рис. 8). К сожалению, в данном эксперименте не была выполнена точная привязка точки наблюдения спектрометра к изображению видеопирометра, в

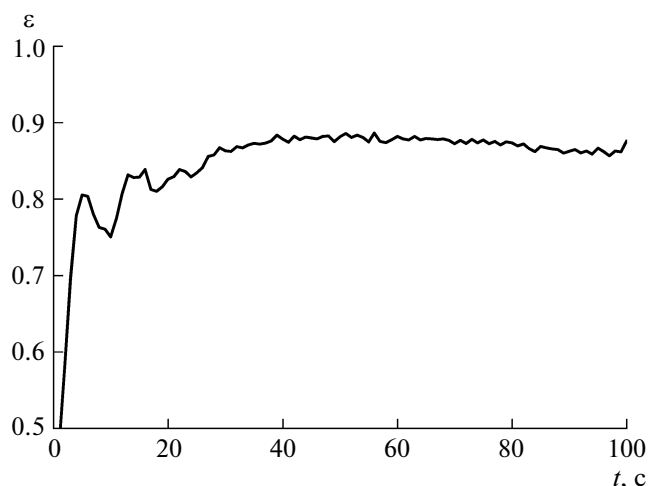


Рис. 8. Изменение излучательной способности поверхности объекта в течение эксперимента.

связи с чем прямое сравнение данных спектрометра и видеопирометра не проводилось.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование п.з.с.-камер для пирометрии является логичной заменой пирометра с фоторегистрацией. Управление экспозицией п.з.с.-камеры позволяет измерять яркостную температуру в широких пределах, обеспечивая максимальную точность измерений.

Проблема прекращения производства температурных ламп может быть решена с помощью светодиодного калибра яркости.

Измерение спектра свечения исследуемого тела, наряду с полем яркости, позволяет обосновать корректность яркостной пирометрии и перейти от яркостной температуры к истинной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейндлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов. М.: Энергия, 1974.
2. Сенюев И.В. // Труды 53-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. Часть VI: Аэромеханика и летательная техника. М.: МФТИ, 2010. С. 181–182.
3. Цхай Н.С. // Журнал прикладной спектроскопии. 1977. XXVII. Вып. 3. № 9. С. 404.
4. Жествков Б.Е. // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. № 6. С. 63.