



УДК.681

В.Е. Мошаров, В.Н. Радченко, И.В. Сенюев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Россия,
140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д. 1. E-mail: mera@tsagi.ru

ПИРОМЕТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС КАМЕР

Описывается методика измерения распределения яркостной температуры поверхности моделей в тепловых аэродинамических трубах с помощью ПЗС камер. Рассматриваются вопросы выбора рабочей длины волны, метрологии ПЗС камеры, градуировки камеры по черному телу и температурным лампам, использования светодиодного калибра для учета пропускания измерительного тракта. Предлагается измерять спектр исследуемой поверхности для обоснования яркостной пирометрии и оценки излучательной способности.

ПИРОМЕТРИЯ, ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА,
СПЕКТРАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПИРОМЕТРИИ

В тепловых аэродинамических трубах требуется измерять температуру поверхности модели в диапазоне до 2000⁰С. Эта задача решается с помощью пирометрии – измерения собственного равновесного теплового излучения объекта исследования в видимой или ближней ИК области спектра.

Равновесное излучение подчиняется закону Кирхгофа, утверждающего, что отношение испускательной способности $u(\lambda, T)$ тел (энергия излучения, испускаемая единицей поверхности за единицу времени) к их поглощательной способности (отношение поглощаемой энергии к энергии падающего потока) $\alpha(\lambda, T)$ не зависит от природы излучающего тела. Оно равно испускательной способности абсолютно чёрного тела $u_0(\lambda, T)$:

$$\frac{u(T, \lambda)}{\alpha(T, \lambda)} = \frac{u_0(T, \lambda)}{1}. \quad (1)$$

Абсолютно чёрное тело - это тело, которое при любой температуре полностью поглощает весь падающий на него поток излучения, независимо от длины волны. Коэффициент поглощения абсолютно чёрного тела, таким образом, равен 1. В природе абсолютно чёрных тел нет. Отличие энергетической яркости рассматриваемого тела от абсолютно черного тела характеризуется излучательной способностью $\varepsilon(T, \lambda)$, называемой также степенью черноты тела, которая равна поглощательной способности $\alpha(T, \lambda)$. Существуют вещества, излучательная способность которых не зависит от длины волны λ излучения в некотором интервале длин волн. Такие тела называются серыми.

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны и температуры дается законом излучения Планка, который и является фундаментом пирометрии:

$$u_0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/k\lambda T) - 1}. \quad (2)$$

Для небольших температур $T < 2500$ К единицу в законе Планка можно отбросить (приближение Вина).

Излучаемая телом энергия, как следует из (2), очень сильно зависит от температуры, а спектральный максимум излучения лежит для рассматриваемых температур в инфракрасной области спектра.

Методы пирометрии, в зависимости от того, какие параметры излучения нагретой поверхности измеряются, можно разделить на радиационные, яркостные и цветовые (спектральные).

Радиационные пирометры измеряют абсолютное суммарное значение мощности излучения нагретой поверхности. Для радиационных пирометров необходимы приемники излучения чувствительные во всем спектральном диапазоне. Точность радиационных пирометров невысока из-за того, что реальные тела могут считаться серыми только в ограниченном диапазоне длин волн.

Яркостные пирометры измеряют абсолютное значение мощности нагретой поверхности на какой-либо длине волны. За яркостную температуру T_j тела, имеющего спектральную испускательную способность u , принимается температура черного тела, имеющего при выбранном значении длины волны ту же величину спектральной яркости. Потребители обычно хотят знать истинную температуру, которую можно получить, зная излучательную способность. Излучательная способность может быть измерена в лабораторных условиях до и после эксперимента на спектрофотометре, оснащенный приставкой для измерения отражения с фотометрическим шаром.

Цветовые пирометры измеряют яркость нагретой поверхности при двух и более значениях длин волн, и по отношению яркостей определяется температура тела T_c из закона Планка (2). Заметим, что для черного и серого тел цветовые температуры совпадают. Главным преимуществом цветковых пирометров является то, что для измерения температуры не требуется абсолютная градуировка и для ряда задач это может иметь решающее значение.

ОСОБЕННОСТИ ПИРОМЕТРИИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

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.

В ЦАГИ сложилась практика использования относительных измерений, 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. Эти лампы имеют габариты, позволяющие в ряде аэродинамических установок размещать их в месте установки модели. Зависимость яркостной температуры таких ламп от тока градуируется на длине волны $\lambda = 0,65$ мкм в ФГУП «Ростест-Москва». Пересчет данных градуировки эталонной лампы на другую длину волны (в случае необходимости) проводится с помощью хорошо известных таблиц распределения излучательной способности вольфрама по длинам волн [1]. Тело накала лампы регистрируется пирометрической измерительной системой при нескольких значениях

яркостной температуры (определяемой по току через лампу), и из полученных значений определяется градуировочная характеристика пирометрической системы в условиях проведения эксперимента.

До появления ПЗС камер чувствительным элементом в пирометрах была фотопленка. Для калибровки фотопленки в каждый кадр впечатывался восьмиступенчатый ослабитель. Многоступенчатый ослабитель необходим для учета нелинейной передаточной характеристики фотопленки. Впечатывание ослабителя в каждый кадр позволяет уменьшить погрешность измерения интенсивности, обусловленную неравномерностью чувствительности фотоэмульсии и процессом проявки фотопленки. Фотопленка обладает большим динамическим диапазоном, но и его не хватает для измерения температуры во всем требуемом диапазоне. Поэтому с ростом температуры в оптический тракт вводятся нейтральные ослабляющие светофильтры. (Для определения момента ввода очередного фильтра может использоваться отдельный электронный канал.)

ПЗС КАМЕРА КАК ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

ПЗС камеры значительно точнее фотопленки и, в сочетании с компьютером, позволяют получать информацию о температуре исследуемого объекта в темпе эксперимента. Необходимо отметить, что для измерения интенсивности света надо использовать именно ПЗС камеры, а не КМОП, точность которых ниже.

ПЗС камеры, в отличие от фотопленки, линейны (если только количество накопленных фотоэлектронов не приближается к предельной емкости пикселей), но пикселя матрицы могут отличаться чувствительностью.

Метрология ПЗС камеры (в сборе с приемным объективом) включает:

- 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 стабильного источника света с различными экспозициями. Линейность упрощает работу с ПЗС камерой и обеспечивает высокую точность измерений, но ограничивает динамический диапазон. Возможность оперативно менять экспозицию в ПЗС камере и задавать ее с высокой точностью позволяет работать при оптимальных сигналах и не использовать нейтральные фильтры.

Разброс чувствительности пикселей ПЗС матрицы и виньетирование учитываются нормировкой всех изображений на изображение «равномерного поля». Изображение «равномерного поля» получается при регистрации равномерно освещенного экрана. Пример изображения «равномерного поля» и схема установки для его регистрации показаны на рис. 1а. Коррекция дисторсии осуществляется путем регистрации эталонного объекта – экрана с контрастными точками, координаты которых точно известны (рис. 1б). Для учета дисторсии можно использовать следующую модель:

$$r_d = b_0 r + b_3 r^3 ; \quad (3)$$

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

Исправление дисторсии необходимо для геометрически неискаженного представления результатов.

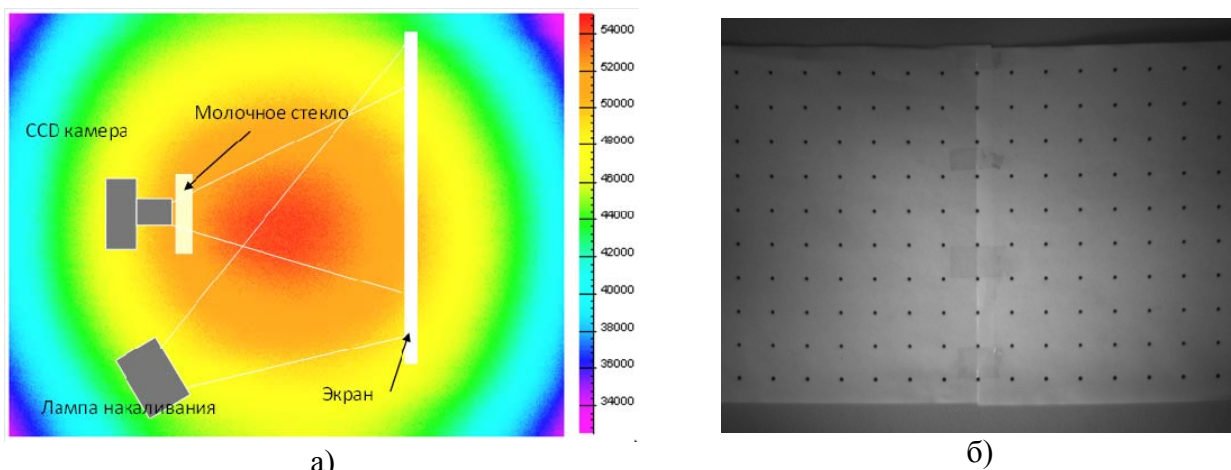


Рис. 1. Калибровка ПЗС камеры: а) по равномерному полю, б) по эталонному объекту

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПИРОМЕТРА

Выбор рабочей длины волны пирометра обусловлен несколькими факторами:

- Смещение в ИК-область позволяет измерять более низкие температуры т.к. интенсивность собственного излучения растет с увеличением длины волны, но надо иметь в виду, что чувствительность ПЗС матриц ограничивается длиной волны около 1 мкм.

- Большинство тел серые в ИК-области и цветные ($\epsilon \equiv \alpha = f(\lambda)$) в видимой области спектра.

- С другой стороны, смещение в ИК-область увеличивает влияние степени черноты ϵ на истинную температуру. Путем дифференцирования формулы Планка в приближении Вина получаем, как ошибка в вычислении температуры связана с ошибкой определения ϵ как:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{\lambda kT}{hc} \cdot \frac{d\epsilon}{\epsilon} \quad (4)$$

- На выбор рабочей длины волны может оказать решающее значение спектр подсветки. Отдельные яркие линии, присутствующие в спектре подогревателя, могут существенно исказить измеряемую яркостную температуру при неудачном выборе длины волны. 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 СВЧ. Если спектр электродугового подогревателя носит ярко выраженный тепловой характер с температурой около 5000 К, то спектр СВЧ подогревателя состоит из отдельных линий и не имеет тепловой компоненты.

СВЕТОДИОДНЫЙ КАЛИБР

Отдельной проблемой в настоящее время является прекращение выпуска температурных ламп отечественной промышленностью. Вместо температурных ламп предлагается широкий спектр моделей черного тела 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.

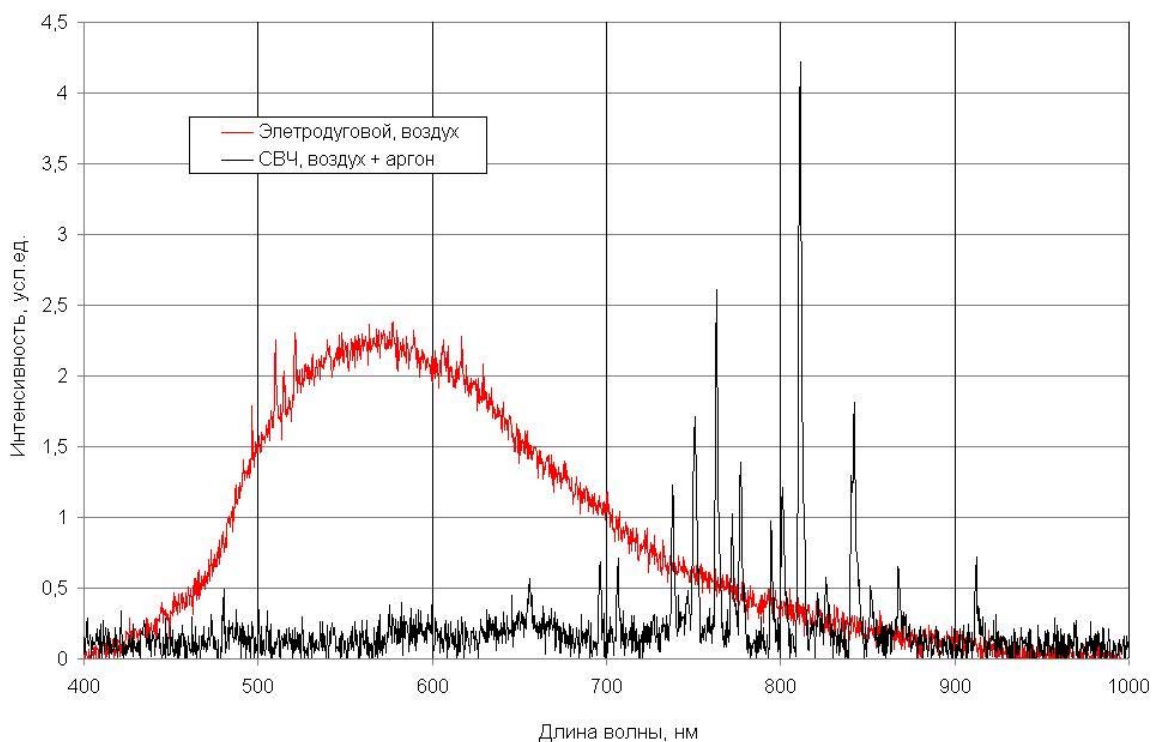


Рис. 2. Спектры электродугового и СВЧ подогревателей.

Для решения этой проблемы нами был разработан светодиодный калибр яркости [2]. Калибр представляет собой замкнутую полость – сферу $\varnothing 40$ мм с отверстием $\varnothing 12$ мм, которое закрыто молочным стеклом, являющимся эталонной поверхностью. Полость сферы освещается 6-ю 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 ПЗС камер. Исследование спектров электродугового и СВЧ подогревателей (см. рис.2) показало, что эту длину волны можно использовать для измерения яркостной температуры.

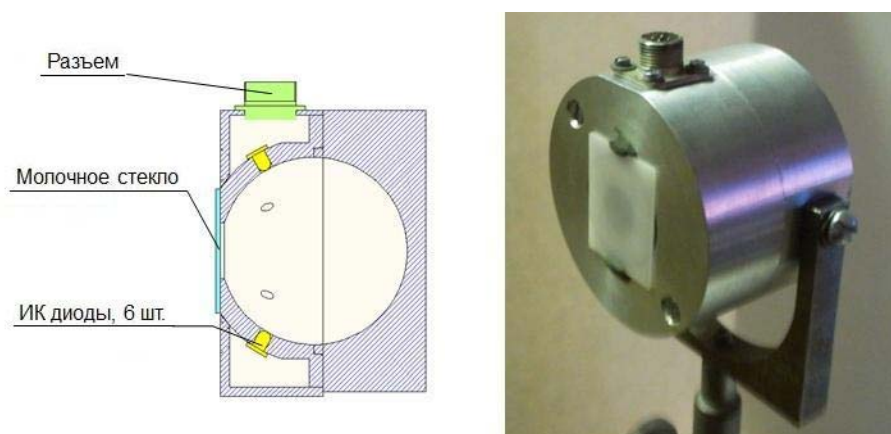


Рис. 3. Схема и внешний вид калибра яркости.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Методика измерения яркостной температуры состоит из следующих операций. В лаборатории, по «черному телу» градуируется ПЗС камера с объективом с фиксированной

диафрагмой. При градуировке ни диафрагма, ни настройка резкости не изменяются, управляется только экспозиция. 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°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 производится коррекция градуировочной характеристики пирометра на пропускание оптического тракта. Процесс коррекции градуировки отображен на рис.4. Во время эксперимента по мере прогрева модели уменьшается экспозиция ПЗС камеры для обеспечения работы на линейном участке.

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

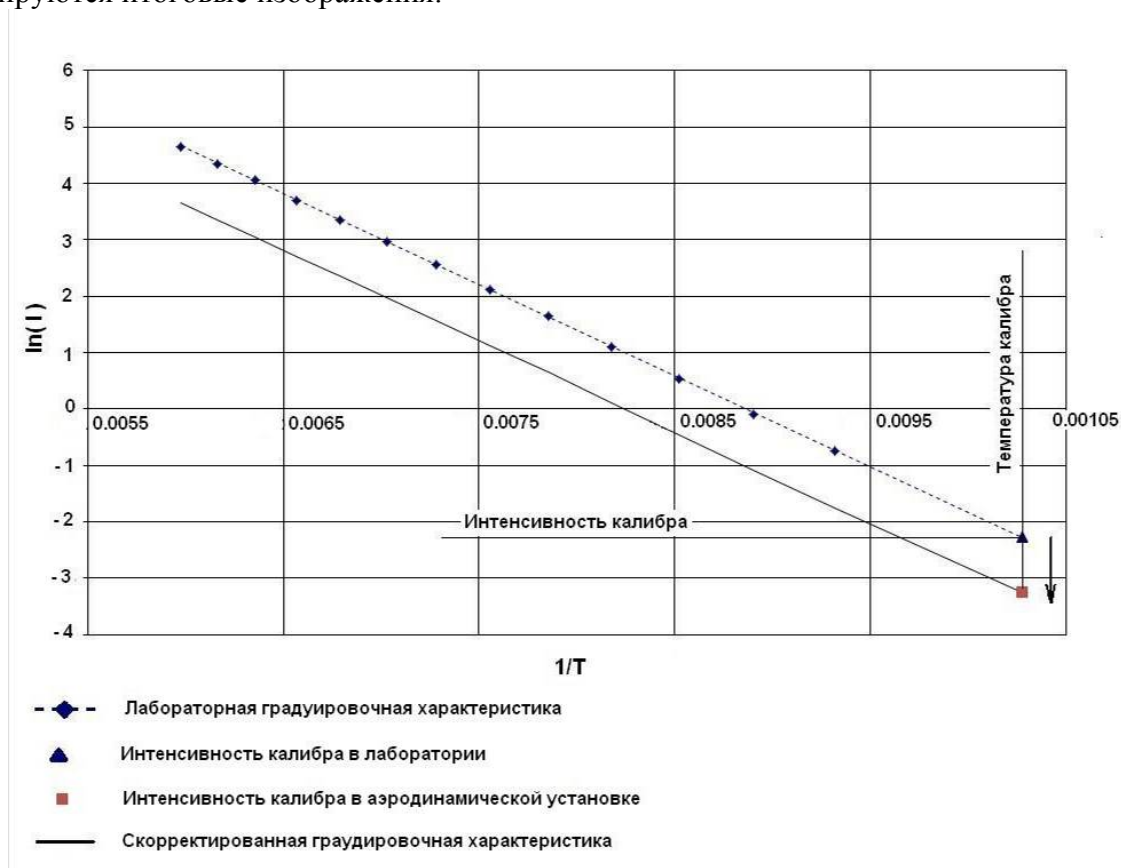


Рис. 4. Градуировка ПЗС камеры и ее коррекция в условиях аэродинамической установки

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Работы по измерению цветовой температуры интенсивно велись в ЦАГИ 25-30 лет назад [3]. Оказалось, что температура, определяемая по интенсивностям на двух длинах волн, чрезвычайно чувствительна к внешней подсветке. Кроме того, всегда остается сомнение в «серости» тела на выбранных длинах волн.

Появление спектрографов с регистрацией спектра при помощи ПЗС 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, полученных в АДТ с электродуговым подогревателем в координатах Вина ($\ln(I \cdot \lambda^5)$, $1/T$) для двух температур поверхности исследуемой модели представлены на рис.5. Здесь же 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. Наклон линейной аппроксимации спектра в этих координатах определяет спектральную температуру T_c , если спектр не аппроксимируется прямой, то тело нельзя считать серым.

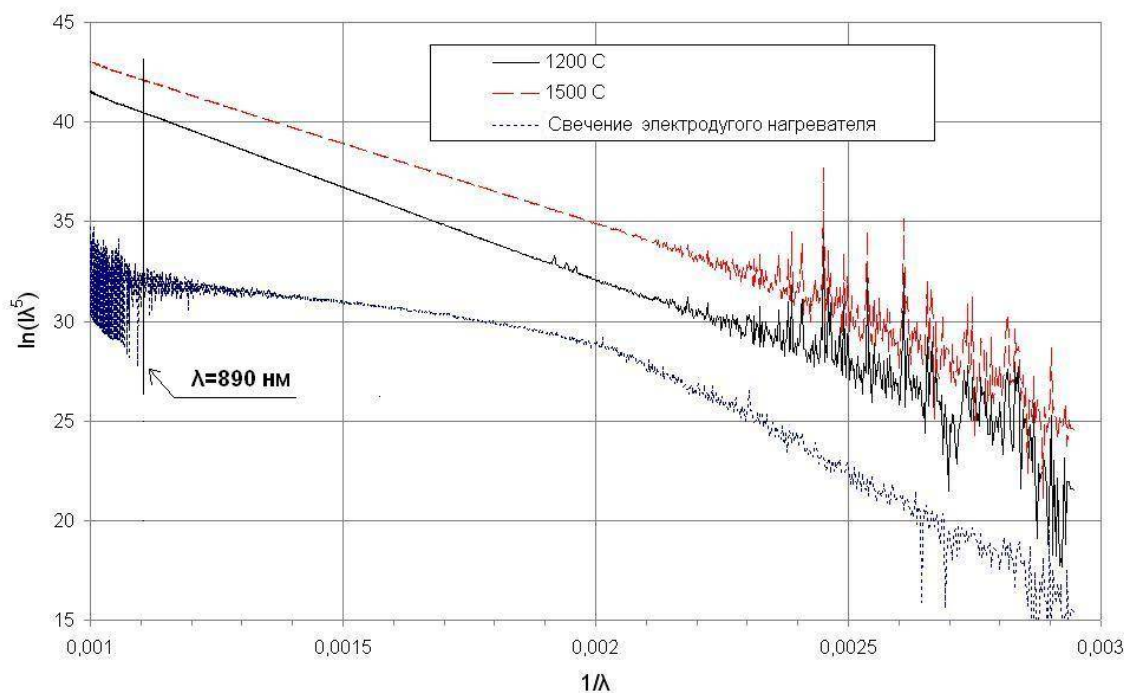


Рис. 5. Спектры свечения поверхности модели в координатах Вина для двух температур и спектр подсветки от электродугового подогревателя на холодной модели

Из рисунка следует, что исследуемую модель можно считать серым телом, и что подсветка от подогревателя пренебрежимо мала по сравнению с собственным излучением модели. Выбор рабочей длины волны пирометра (890 нм) был сделан правильно.

Если провести абсолютную градуировку спектрометра по черному телу, то наряду со спектральной температурой можно получить яркостную T_j для каждой длины волны, а из отношения испускательных способностей тела при T_j и T_c – излучательную способность (степень черноты) исследуемого тела:

$$\varepsilon(\lambda, T_c) = u_0(\lambda, T_j) / u_0(\lambda, T_c). \quad (5)$$

Измерение изменения ε 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Проблемы прекращения производства температурных ламп могут быть решены с помощью светодиодного калибра яркости.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейндлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов. – Москва.: Энергия, 1974.- 470 с.
2. Сенюев И.В. Разработка светодиодного калибра яркости для пирометрии. // Труды 53-й научной конференции МФТИ, часть VI: Аэромеханика и летательная техника. Москва-Жуковский МФТИ. 2010. С.181
3. Цхай Н.С. Спектральный метод определения излучательной способности поверхности нагретых тел. // Журнал прикладной спектроскопии. XXVII. Вып.3. № 9. 1977.

V.E. Mosharov, V.N. Radchenko, I.V. Senuev

Central AeroHydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky str.1, Zhukovsky, Moscow reg., 140180 Russia.

E-mail: mera@tsagi.ru

PYROMETRY USING CCD CAMERAS

The methodology of brightness surface temperature distribution measurements in the thermal wind tunnel using CCD cameras is described. The problems of operating wavelength choice, CCD camera metrology, camera calibration by black body and temperature lamps, LED reference etalon usage for measurement channel transmission correction are discussed. It is proposed to measure the spectra of the investigated surface to validate the brightness pyrometry and to evaluate the surface emissivity.

PYROMETRY, BRIGHTNESS TEMPERATURE, COLOR TEMPERATURE, SPECTRAL TEMPERATURE