

## Развитие измерений излучательной способности в вакууме в ПТБ

А. Р. АДИБЕКЯН\*, К. МОНТЕ\*, М. КЕРТ\*, С. П. МОРОЗОВА\*\*, Б. ГУТШВАГЕР\*, И. ХОЛЛАНДТ\*

\* Национальный метрологический институт (ПТБ), Берлин, Германия,  
e-mail: Albert.Adibekyan@PTB.de

\*\* Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,  
Москва, Россия

Рассмотрена согласованность значений спектральной яркости двух эталонных вакуумных абсолютно черных тел (низко- и среднетемпературного) в диапазоне 80 — 170 °С, входящих в состав установки для измерения излучательной способности в вакууме. Показано, что с помощью этой установки можно измерять спектральную плотность энергетической яркости при низких радиационных температурах (до –100 °С) в диапазоне длин волн 4,5 — 20 мкм. Приведены характеристики внутреннего покрытия сферической оболочки образца, необходимые для проведения измерений в дальнем инфракрасном диапазоне и совместимости с условиями вакуума и низких температур.

**Ключевые слова:** излучательная способность, вакуум, спектральная плотность энергетической яркости, абсолютно черное тело.

The concordance of values of spectral luminance of low and medium temperature standard vacuum blackbodies from the composition of installation for emissivity in vacuum measurements in the range 80 — 170 °C is considered. It is shown that by means of this installation is possible to measure the spectral radiance at low (up to –100 °C) radiation temperatures in the wavelength range 4,5 — 20 μm. The characteristics of the inner coating of the sample spherical enclosure needed at FIR emissivity measurements and for compatibility with vacuum and low temperature conditions are presented.

**Key words:** emissivity, vacuum, spectral radiance, blackbodies.

Измерения безразмерной величины — направленной спектральной излучательной способности — в настоящее время проводятся в ПТБ на установке, работающей на воздухе, при температуре 80 — 500 °С в спектральном диапазоне 4 — 40 мкм и являются типовой метрологической услугой. Новая аппаратура для измерений излучательной способности в вакууме, которая представляет часть низкофонового калибровочного комплекса (НФКК), значительно расширит возможности таких измерений. Данная установка позволит исследовать образцы при температурах 0 — 600 °С в угловом  $\pm 75^\circ$  и спектральном 0,4 — 1400 мкм диапазонах. Ее применение также уменьшит неопределенность измерения излучательной способности, так как будут устранены две главные составляющие неопределенности, возникающие при нахождении температуры исследуемого образца из-за потерь тепла вследствие конвекции воздуха при высоких температурах (данное значение неопределенности необходимо для точного определения температуры поверхности образца на воздухе) и в результате поглощения атмосферы при изменении парциальных давлений  $H_2O$  и  $CO_2$ .

Установка в составе НФКК, приведенная на рис. 1, подробно описана в [1]. Она содержит несколько опорных источников: два вакуумных абсолютно черных тела (АЧТ) с регулируемой температурой излучения расположены в камере источников излучения — низкотемпературное (НВЧТ) [2], работающее в температурном диапазоне –173 ... +170 °С, и среднетемпературное (СВЧТ) [3], предназначенное для температур 80 — 430 °С. Третий (холодный) опорный источник — охлаждаемое жидким азотом АЧТ — установлен в

верхней части оптико-механической системы. Камера источников излучения имеет также дополнительное место, чтобы разместить испытываемый источник для калибровки, либо сферическую оболочку с расположенным внутри образцом для спектрального измерения излучательной способности (см. рис. 1, б). Излучение выходит через круглое отверстие во фронтальной части сферы. Справа на подвижном столике установлены два эталонных излучателя — СВЧТ и НВЧТ.

В настоящее время существуют две схемы регистрации излучения, предполагающие использование:

вакуумного инфракрасного фурье-спектрометра с регистрацией по спектральной яркости в диапазоне 0,4 — 1400 мкм. В этом случае излучение от АЧТ или образца отражается от внеосевого эллипсоидального зеркала, расположенного на подвижном столике в камере приемников излучения (см. рис. 1, а);

вакуумного эталонного инфракрасного радиационного пирометра излучения [4] с регистрацией по радиационной температуре в диапазоне –170 ... +170 °С в спектральной полосе 8 — 14 мкм.

Вакуумный фурье-спектрометр имеет несколько приемников, которые можно применять при измерениях излучательной способности: InSb-приемник (длины волн 1 — 5 мкм); МСТ-приемник, где МСТ — mercury cadmium telluride, (2,5 — 20,0 мкм); пироэлектрический DLaTGS-приемник для среднего инфракрасного (ИК) диапазона (2,5 — 25 мкм); пироэлектрический DTGS-приемник для дальнего ИК-диапазона (15 — 200 мкм); охлаждаемый жидким гелием крем-

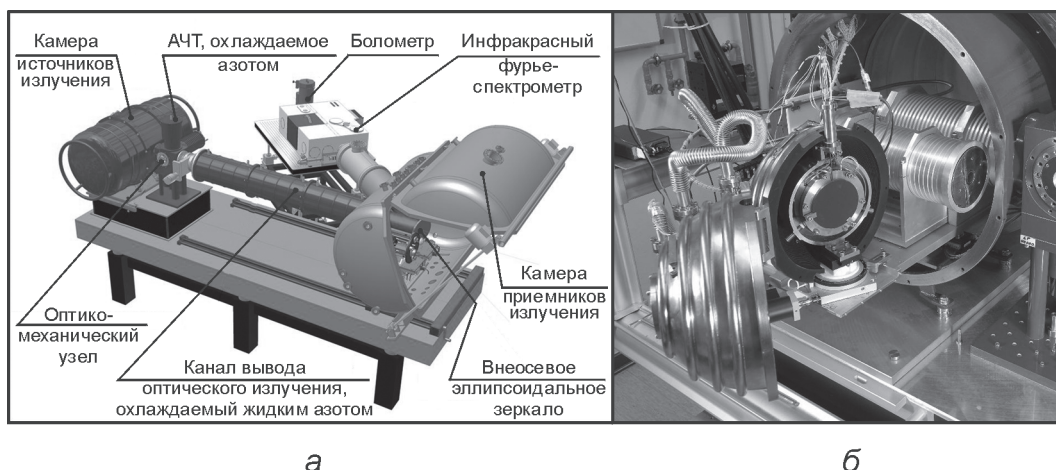


Рис. 1. Внешний вид низкофонового калибровочного комплекса (а) и открытой камеры источников излучения (б)

ниев-композитный болометр для дальнего ИК-диапазона (10 — 1400 мкм). Все части оптического тракта НФКК (см. рис. 1, а) — оптико-механический блок, канал вывода оптического излучения, проходящий между камерами источников и приемников излучения, а также все апертуры охлаждаются жидким азотом. Как правило, отдельные части имеют температуру ниже  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Держатель образца для измерений излучательной способности (см. рис. 1, б) регулируется в температурном диапазоне  $0\text{ — }600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нагреватель с образцом может вращаться с помощью высокоточного электродвигателя, что позволяет выполнять измерения в угловом диапазоне  $\pm 75^{\circ}$  относительно нормали к поверхности. Температурой сферической оболочки можно управлять в диапазоне от  $-80$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на ее внутренней поверхности сделаны V-образные канавки и нанесено специальное покрытие Nextel Velvet Black 811-21.

Цели настоящей статьи состоят в том, чтобы показать: согласованность двух эталонных излучателей — НВЧТ и СВЧТ, — которая является необходимым условием корректной работы предложенной схемы измерений излучательной способности;

возможности НФКК по измерению яркостей, соответствующих значениям радиационной температуры, для измерений направленной спектральной излучательной способности образцов в диапазоне температур существенно ниже  $0$  и до  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

пригодность внутреннего покрытия сферической оболочки для измерения спектральной излучательной способности, исследования покрытия на температурную стабильность, а также ответить на вопрос, способны ли данная структура и тип покрытия существенно снизить излучение, падающее от него на образец.

**Энергетическая яркость опорных излучателей НВЧТ и СВЧТ.** Схема расчета для измерений излучательной способности в вакууме, описанная в [1], основана на сравнении результатов последовательных измерений спектральных плотностей энергетических яркостей исследуемого образца, находящегося внутри сферической оболочки со стабилизированной температурой, и опорных АЧТ при различных температурах. При этом температуры одного АЧТ  $T_{\text{АЧТ}2}$  и образца  $T_{\text{обр}}$  близки, а температура другого  $T_{\text{АЧТ}1}$  значительно отличается от  $T_{\text{обр}}$ :

$$Q = \frac{\tilde{L}_{\text{обр}}(T_{\text{обр}}) - \tilde{L}_{\text{АЧТ}1}(T_{\text{АЧТ}1})}{\tilde{L}_{\text{АЧТ}2}(T_{\text{обр}}) - \tilde{L}_{\text{АЧТ}1}(T_{\text{АЧТ}1})}. \quad (1)$$

Здесь и далее  $\tilde{L}$  означает измеренное значение спектральной плотности энергетической яркости  $L$ . Необходимое условие для использования данного метода измерений — согласованность двух опорных АЧТ. Для проверки этого условия были измерены и сравнены спектральные яркости НВЧТ и СВЧТ при  $80; 110; 140$  и  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Измерения и схема оценки.* Для устранения дрейфа и фонового излучения каждый раз выполняли последовательность измерений, включающую регистрацию сигнала и фона (от АЧТ, охлаждаемого жидким азотом). В данном эксперименте измеренный сигнал спектральной яркости АЧТ определяется как

$$\tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_{\text{АЧТ}}) = s(L_{\text{АЧТ}}(T_{\text{АЧТ}}) + L_{\text{ф}} - L_{\text{пр}}), \quad (2)$$

где  $s$  — спектральная чувствительность спектрометра;  $L_{\text{АЧТ}}(T_{\text{АЧТ}}) = \varepsilon_{\text{АЧТ}} L_{\text{П}}(T_{\text{АЧТ}})$  — спектральная плотность энергетической яркости АЧТ, определяемая полученным по закону Планка значением  $L_{\text{П}}(T_{\text{АЧТ}})$ , при температуре и эффективной направленной спектральной излучательной способности  $\varepsilon_{\text{АЧТ}}$  АЧТ;  $L_{\text{ф}}, L_{\text{пр}}$  — спектральные плотности энергетической яркости теплового фона НФКК и приемника, соответственно.

Измеренная спектральная плотность энергетической яркости «холодного» опорного АЧТ, охлаждаемого жидким азотом, определяется аналогично (см. (2)):

$$\tilde{L}_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}(T_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}) = s(\rho_{\text{м}} L_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}(T_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}) + L_{\text{ф}} + L_{\text{м}}(T_{\text{м}}) - L_{\text{пр}}). \quad (3)$$

Здесь  $\rho_{\text{м}}$  — направленный спектральный коэффициент отражения вращающегося диска (модулятора), который отражает излучение «холодного» опорного АЧТ со спектральной плотностью энергетической яркости  $L_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}(T_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)}) = \varepsilon_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)} L_{\text{П}}(T_{\text{АЧТ}(\text{LN}_2)})$  и направляет его вдоль оптической

оси;  $L_M(T_M) = \varepsilon_M L_{\Pi}(T_M)$  — спектральная плотность энергетической яркости дополнительного излучения вращающегося диска с высоким коэффициентом отражения, которое добавляется только к измерениям фона.

Разность уравнений (2), (3) позволяет устранить как фоновое излучение  $L_{\Phi}$ , так и собственное излучение приемника  $L_{\text{пр}}$ :

$$\begin{aligned} & \tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_{\text{АЧТ}}) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) = \\ & = s(L_{\text{АЧТ}}(T_{\text{АЧТ}}) - \rho_M L_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) - L_M(T_M)). \end{aligned} \quad (4)$$

Последовательное усреднение таких разностей в процессе измерений также позволяет избежать влияния теплового дрейфа аппаратуры.

В процессе эксперимента для каждого АЧТ по (4) измеряется последовательность разностей яркостей. Для сравнения работы двух таких тел предполагается, что излучение одного АЧТ (в данном случае — НВЧТ) определяется его эффективной излучательной способностью и законом Планка при его рабочей температуре. Отклонение радиационной температуры другого АЧТ от его рабочей температуры является мерой согласованности обоих тел. Яркость СВЧТ, полученная из отношения двух независимых уравнений (4) для НВЧТ и СВЧТ, может быть рассчитана по формуле

$$\begin{aligned} L_{\text{СВЧТ}}(T) = & \frac{(\tilde{L}_{\text{СВЧТ}}(T) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)})) (L_{\text{НВЧТ}}(T) - \\ & \tilde{L}_{\text{НВЧТ}}(T) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}))}{\tilde{L}_{\text{НВЧТ}}(T) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)})} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{-\rho_M L_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) - L_M(T_M)}{+} + \\ & + L_M(T_M) + \rho_M L_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Значение спектральной плотности энергетической яркости вращающегося диска можно рассчитать по результатам независимой серии измерений НВЧТ при температурах  $T_1$ ,  $T_2$ . Из (4) следует

$$\begin{aligned} & \tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_{1,2}) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) = \\ & = s(L_{\text{АЧТ}}(T_{1,2}) - \rho_M L_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) - L_M(T_M)). \end{aligned}$$

После преобразований имеем

$$\begin{aligned} L_M(T_M) = & L_{\text{АЧТ}}(T_2) - \rho_M L_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)}) - \\ & \frac{(\tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_2) - \tilde{L}_{\text{АЧТ(LN}_2)}(T_{\text{АЧТ(LN}_2)})) (L_{\text{АЧТ}}(T_1) - L_{\text{АЧТ}}(T_2))}{\tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_1) - \tilde{L}_{\text{АЧТ}}(T_2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

**Сравнение АЧТ.** Измерения проводили с применением вакуумного фурье-спектрометра с МСТ-приемником, охлаждаемым жидким азотом, и калий-бромидного широкополосного светоделиителя в диапазоне длин волн 4,2 — 15,4 мкм. Указанный приемник был скорректирован по нелинейности [5]. Результаты измерений для температур 80 и 170 °С

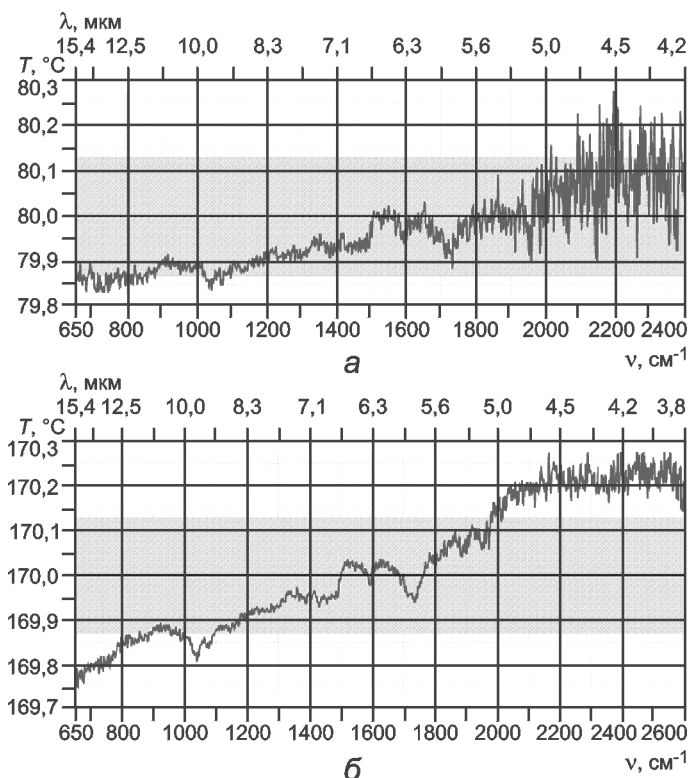


Рис. 2. Спектральное распределение радиационной температуры СВЧТ, определенное относительно НВЧТ в соответствии с (5), при номинальных температурах 80 °С (а) и 170 °С (б); серым цветом показан диапазон суммарной расширенной неопределенности при температуре излучения

представлены в виде зависимости радиационной температуры АЧТ от длины волны (волнового числа), рассчитанной с помощью обратной функции Планка (рис. 2). Серым цветом показан диапазон суммарной расширенной неопределенности радиационной температуры, равный  $\pm 130$  мК, вычисленный с учетом неопределенности температурных датчиков и эффективной излучательной способности обоих АЧТ. Различия в радиационных температурах эталонных излучателей НВЧТ и СВЧТ находятся в пределах  $\pm 150$  мК при 80 °С и  $\pm 200$  мК при 170 °С. Отклонение в  $\pm 200$  мК объясняется дополнительной неопределенностью, вносимой тепловым дрейфом фурье-спектрометра, которая не учитывается в представленной на диаграммах расширенной суммарной неопределенности радиационной температуры обоих АЧТ. Приняв значение 150 мК в качестве неопределенности измерений с помощью фурье-спектрометра, можно заключить, что НВЧТ и СВЧТ согласованы друг с другом и могут использоваться как эталонные источники излучения.

**Измерение радиационной температуры НВЧТ в диапазоне температур от -100 до +140 °С и длин волн 4,5 — 20 мкм.** Целью работы было показать возможность последовательных измерений низких (до -100 °С) температур с применением фурье-спектрометра в указанном диапазоне длин волн. Предполагали, что фурье-спектрометр можно использовать как устойчивый инструмент с постоянной спектральной чувствительностью в течение пяти дней. Для этого спектрометр был откалиброван при двух темпе-

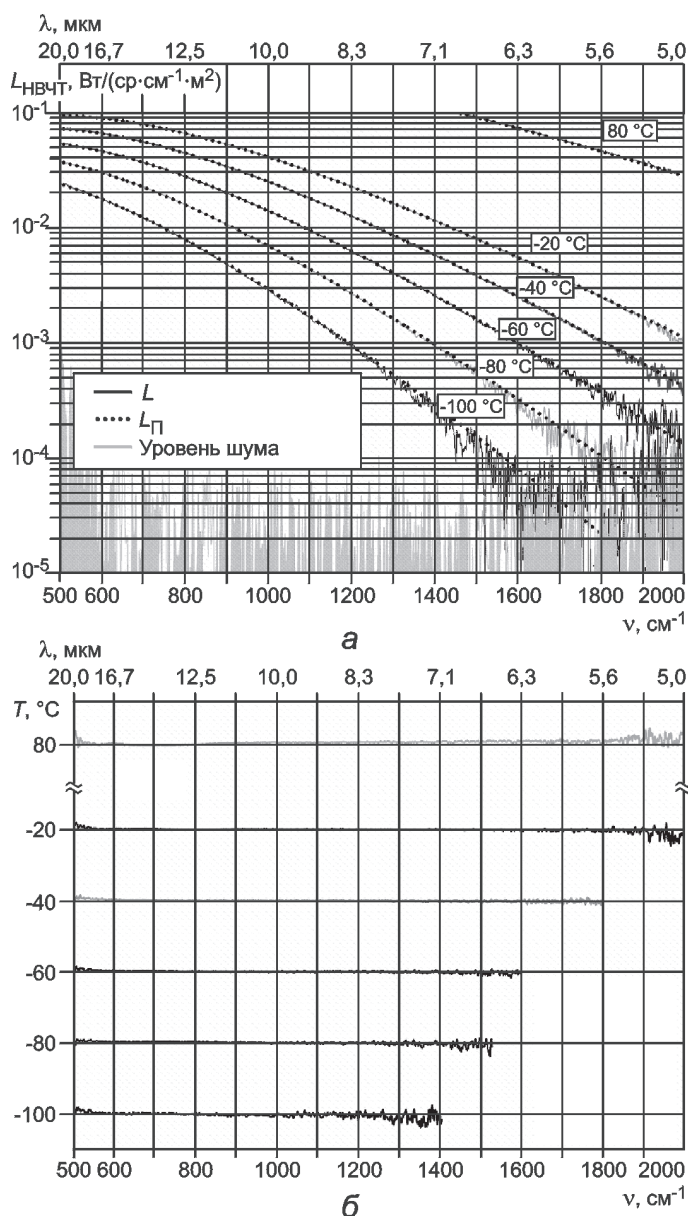


Рис. 3. Рассчитанная по результатам измерений энергетическая яркость излучателя НВЧТ (сплошные линии), регистрируемая приемником МСТ, в сравнении с соответствующими теоретическими значениями (точки), рассчитанными по закону Планка (а), и спектральное распределение радиационной температуры НВЧТ, вычисленное по обратному закону Планка (б)

ратурах НВЧТ: 0 и 170 °С. Спектральная чувствительность  $s$  и излучение модулятора  $L_M(T_M)$  определены из (4), (6) и затем использованы при вычислении разности значений яркости в соответствии с (3) для НВЧТ:

$$L_{\text{НВЧТ}}(T) = (\tilde{L}_{\text{НВЧТ}}(T) - \tilde{L}_{\text{АЧТ}}(LN_2)(T_{\text{АЧТ}}(LN_2))) / s + L_M(T_M) + \rho_M L_{\text{АЧТ}}(LN_2)(T_{\text{АЧТ}}(LN_2)). \quad (7)$$

Измерения были выполнены с различными приемниками.

**Приемник МСТ.** Первую серию измерений проводили с помощью вакуумного фурье-спектрометра, широкополосного КВr-светоделителя и охлаждаемого жидким азотом приемника МСТ. Экспериментально полученные спектральные яркости НВЧТ и теоретические значения, рассчитанные по закону Планка при различных температурах от  $-100$  до  $+80$  °С, показаны на рис. 3, а. Дополнительно изображен уровень шумов этих измерений, который был определен с учетом среднего квадратического отклонения серии измерений при  $0$  °С. Для представления результатов в форме зависимости радиационной температуры от длины волны использована обратная форма закона Планка. Итоговое спектральное распределение радиационной температуры для различных значений температуры АЧТ представлено на рис. 3, б.

Отклонения радиационной температуры от ее номинального значения находятся в пределах  $\pm 0,5$  К для измерений при  $-60$ ,  $-80$  и  $-100$  °С, и меньше этого значения для измерений при  $-20$  и  $-40$  °С. Излучатели НВЧТ и СВЧТ согласованы в пределах  $\pm 0,2$  К при прямом сравнении (см. рис. 2). Наблюдаемое здесь большее отклонение, главным образом, вызвано дрейфом спектральной чувствительности фурье-спектрометра в течение нескольких дней.

Как упоминалось выше, целью данной серии измерений являлась проверка работы НФКК в широких температурном и спектральном диапазонах, а не высокоточное сравнение излучения АЧТ с теоретическим излучением, описываемым законом Планка. Таким образом, радиационную температуру излучения до  $-100$  °С и излучательную способность можно стабильно измерять вакуумным фурье-спектрометром и приемником МСТ, охлаждаемым жидким азотом.

**Приемник DLaTGS.** Вторую серию измерений выполняли с применением вакуумного фурье-спектрометра с широкополосным КВr-светоделителем и пироэлектрического приемника DLaTGS. Результаты экспериментального определения спектральной яркости НВЧТ и теоретические значения, рассчитанные по закону Планка при температурах от  $-100$  до  $+140$  °С, показаны на рис. 4, а, как и учтенный при расчете уровень шума. Спектральную радиационную температуру НВЧТ также рассчитывали через яркость с использованием обратной формы закона Планка в соответствии с (7) (рис. 4, б). В данном случае спектральной яркостью АЧТ, охлаждаемого жидким азотом, можно пренебречь из-за более высокого уровня шума приемника DLaTGS. Отклонение радиационной температуры от закона Планка, как и у приемника МСТ, лежит в пределах  $\pm 0,5$  К в зависимости от длины волны и вызвано дрейфом спектральной чувствительности фурье-спектрометра в течение нескольких дней.

Измерения с использованием приемника DLaTGS при более низких температурах сопровождаются значительно большим уровнем шумов, чем с применением приемника МСТ, однако первый имеет более широкий спектральный диапазон и также демонстрирует согласованные и стабильные измерения радиационных температур. Таким образом, радиационное излучение и излучательную способность в температурном диапазоне  $-100 \dots +140$  °С можно стабильно

измерять при помощи вакуумного фурье-спектрометра и пирозлектрического приемника DLaTGS.

**Характеристики и результаты испытания покрытия сферической оболочки образца.** Направленную спектральную излучательную способность образца, исследуемого на НФКК, можно рассчитать из (1), если известны значения температур обоих эталонных АЧТ, приемника, поверхности образца и плотности падающего на образец излучения от полусферической оболочки. Эта плотность определяется температурой оболочки и ее излучательной способностью. Поэтому точное значение направленной спектральной излучательной способности сферической оболочки необходимо для вычисления направленной спектральной излучательной способности образца. Более того, данное значение должно быть максимально возможным, чтобы уменьшить многократные отражения между образцом и полусферической оболочкой для точного вычисления доли излучения, падающего на образец от оболочки, и возможную температурную вариацию излучательной способности оболочки.

По этой причине внутренняя поверхность сферической оболочки была покрыта круговыми канавками ( $60^\circ$ ) и дополнительно нанесено черное покрытие, обеспечивающее излучательную способность более 0,98, в качестве которого использовали краску Nextel Velvet Black 811-21. Для проверки характеристики покрытия были изготовлены два одинаковых образца с такой же, как у сферической оболочки, поверхностной структурой, с канавками идентичной геометрии, также выполненные из меди и химически покрытые никелем. Затем образцы были очищены с применением пескоструйной машины, после чего на них была нанесена краска Nextel 811-21, на один — с грунтовкой, а на другой — без нее.

Для испытания покрытия на его пригодность для измерений излучательной способности в среднем и дальнем ИК-диапазонах и совместимость с условиями вакуума и низких температур были выполнены следующие измерения. Направленную спектральную излучательную способность двух образцов определяли на установке для измерения излучательной способности на воздухе [6, 7] до и после ряда циклов охлаждения в жидком азоте. Кроме того, направленный спектральный коэффициент отражения в дальнем ИК-диапазоне этих образцов был также определен до и после испытания на охлаждение. Образец без грунтовки показал недостаточную механическую стабильность покрытия. Далее представлены только результаты измерения образца, покрытого грунтовкой.

Направленная спектральная излучательная способность  $\epsilon$  сферической оболочки была определена при температуре  $120^\circ\text{C}$ . Результирующая спектральная излучательная способность образца и диапазон стандартной неопределенности ( $P = 0,95$ ), рассчитанный в соответствии с [7], показаны на рис. 5, из которого следует, что  $\epsilon$  уменьшается примерно на 0,01 после первого охлаждения, а затем остается постоянной относительно стандартной неопределенности и на желательном уровне 0,98.

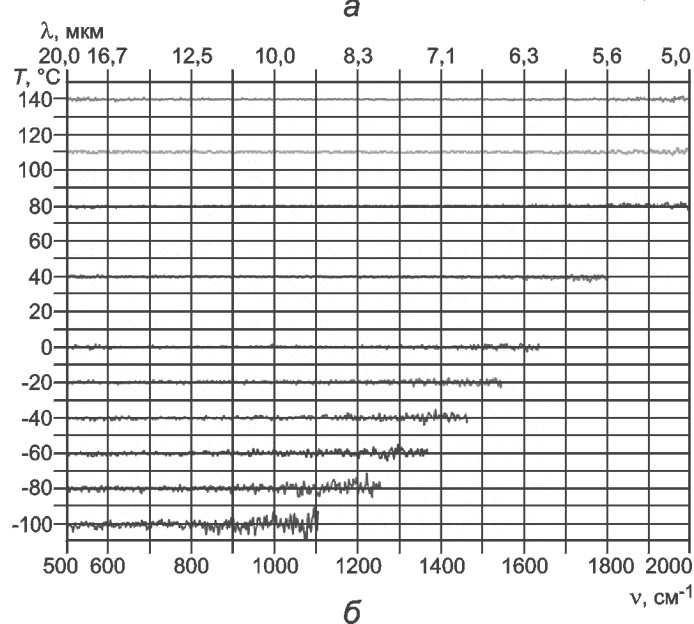
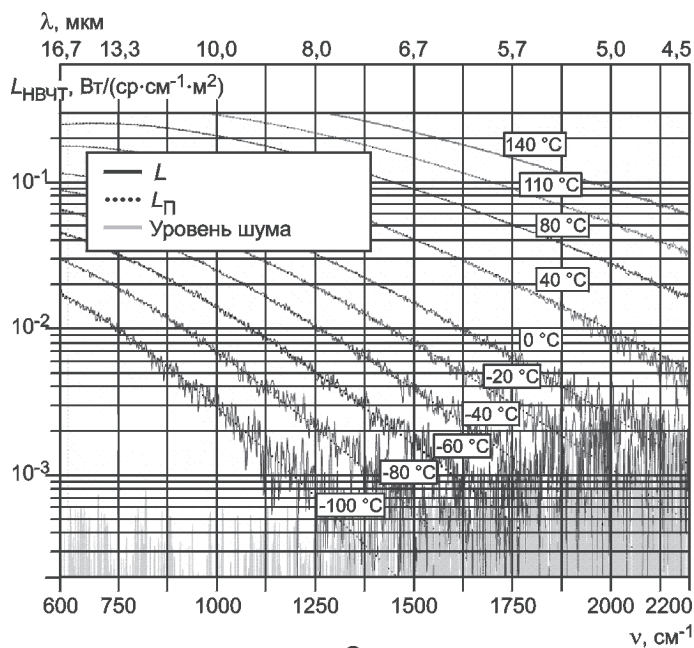


Рис. 4. Рассчитанная по результатам измерений энергетическая яркость излучателя НВЧТ (сплошные линии), регистрируемая приемником DLaTGS, в сравнении с соответствующими теоретическими значениями (точки), рассчитанными по закону Планка (а), и спектральное распределение радиационной температуры излучателя (б)

Направленный ( $12^\circ/12^\circ$ ) спектральный коэффициент отражения  $\rho$  сферической оболочки измеряли с использованием вакуумного фурье-спектрометра и кремний-композитного болометра. Результаты после испытания на охлаждение в жидком азоте для диапазона длин волн 12,5 — 100 мкм показаны на рис. 6, откуда следует, что  $\rho$  не изменился после охлаждения и остался ниже 0,1.

Таким образом, спектральный коэффициент отражения и направленная спектральная излучательная способность

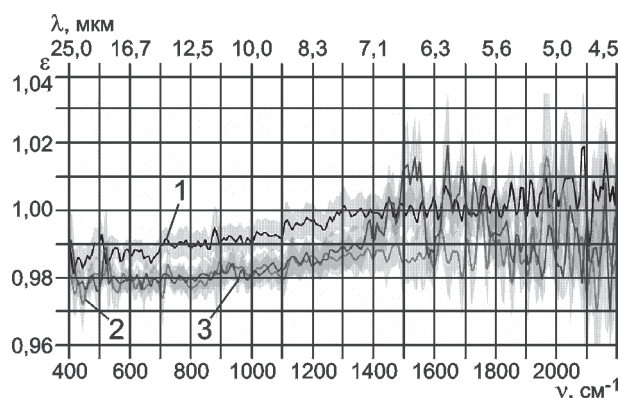


Рис. 5. Направленная спектральная излучательная способность  $\epsilon$  образца при температуре 120 °С, наблюдаемая под углом 5°: до (кривая 1), после первого (кривая 2) и второго (кривая 3) охлаждения жидким азотом; серым цветом показан диапазон стандартной неопределенности

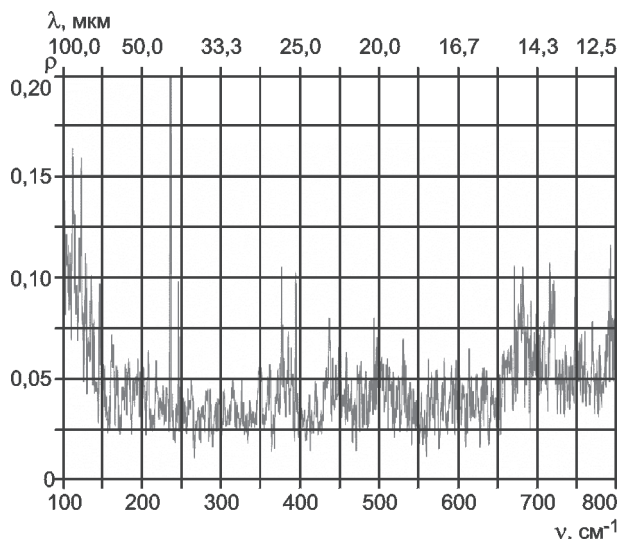


Рис. 6. Направленный (12°/12°) спектральный коэффициент отражения поверхности образца после охлаждения

этого покрытия удовлетворяют требованиям к внутренней поверхности сферической оболочки по его пригодности для измерений излучательной способности в дальнем ИК-диапазоне и совместимости с условиями вакуума и низкой температуры.

**Заключение.** На запущенной в ПТБ установке для измерения излучательной способности в вакууме как части НФКК [1] были выполнены первые испытания. В настоящее время для измерений на НФКК, как правило, используют два эталонных источника излучений — вакуумных АЧТ — и две схемы измерения — по спектральной яркости с применением

вакуумного фурье-спектрометра в диапазоне длин волн 0,4 — 1400 мкм и по радиационной температуре с помощью вакуумного эталонного инфракрасного радиационного пирометра излучения в спектральной полосе 8 — 14 мкм.

Вакуумный фурье-спектрометр в данной работе использовали, чтобы показать, что два эталонных АЧТ переменной температуры согласованы в пределах  $\pm 150$  мК при 80 °С и  $\pm 200$  мК при 170 °С. Это исследование было проведено в диапазоне, охватывающем температурные области работы двух АЧТ (80 — 170 °С), которые будут служить в качестве первичных источников теплового излучения от  $-173$  до  $+430$  °С.

Кроме того, показано, что спектральная плотность энергетической яркости излучения при низких температурах (до  $-100$  °С) в диапазоне длин волн 4,5 — 20 мкм может быть стабильно и согласованно измерена этим спектрометром.

Измерения излучательной способности и коэффициента отражения образцов, очищенных пескоструйной машиной и покрытых краской Nextel Velvet Black 811-21, показали пригодность этого покрытия для применения в качестве внутренней поверхности сферической оболочки образца при измерениях излучательной способности в условиях низких температур и вакуума.

#### Литература

1. **Monte C. e. a.** Radiation thermometry and emissivity measurements under vacuum at the PTB // Intern. J. Thermophys. 2009. V. 30. P. 203—219.
2. **Morozova S. P. e. a.** Vacuum variable temperature blackbody VLTBB100 // Intern. J. Thermophys. 2008. V. 29. P. 341—351.
3. **Morozova S. P. e. a.** Vacuum variable medium temperature blackbody (VMTBB) // Intern. J. Thermophys. 2010. V. 31. P. 1809—1820.
4. **Gutschwager B., Gärtner R., Hollandt J.** An infrared precision radiation thermometer for the calibration of remote sensing instrumentations // SPIE vacuum image and signal processing for remote sensing XV. 2009. P. 7477.
5. **Pat. 4927269 1-10 USA. 1990.**
6. **Monte C., Hollandt J.** The measurement of directional spectral emissivity in the temperature range from 80 °С to 400 °С at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt // High Temperatures — High Pressures. 2010. V. 39. P. 151—164.
7. **Monte C., Hollandt J.** The determination of the uncertainties of spectral emissivity measurements in air at the PTB // Metrologia. 2010. V. 47. P. S172—S181.

Дата принятия 15.05.2012 г.