
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.483, 536.332
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-4-311-316

ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ МОНОТОННОГО НАГРЕВА

Е. В. ЛАПОВОК, Д. А. МОСИН, М. М. ПЕНЬКОВ,
И. А. УРТМИНЦЕВ, С. И. ХАНКОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: leva0007@rambler.ru*

Предложен метод измерения степени черноты поверхностей образцов в малогабаритной криогенно-вакуумной камере. Описаны физическая и математическая модели измерительного узла. Рабочий температурный диапазон для измерений степени черноты задается температурой криогенного экрана, мощностью пленочного электронагревателя и длительностью нагрева. Показано, что для медных образцов толщиной 1 мм и диаметром 2 см при потребляемой электрической мощности десятые доли ватта, а также при температуре экрана 80—150 К минимальные погрешности измерений достигаются при длительности процесса от 10 до 20 минут. Использование предложенного метода сокращает время измерения степени черноты на порядок по сравнению с методом измерений в стационарном тепловом режиме (при использовании последнего для поддержания на одинаковом уровне стационарных температур образцов с разной степенью черноты поверхностей необходимо задавать соответствующие значения мощности тепловыделений). В предложенном методе задается постоянное значение мощности, слабо зависящее от начальной температуры образца. Важным преимуществом предложенного метода измерения степени черноты поверхностей является значительная экономия энергии на криостатирование экрана за счет сокращения времени на одну процедуру измерения.

Ключевые слова: *степень черноты, поверхности, метод монотонного нагрева, теплообмен излучением, криогенно-вакуумная камера, проточная система криостатирования*

Введение. Степень черноты, или интегральная излучательная способность, покрытий* является важнейшей характеристикой, определяющей интенсивность теплообмена излучением между поверхностями [1—4], а также температурный уровень поверхностей космических аппаратов [5—8]. Большое практическое значение имеет разработка эффективных методов измерения степени черноты покрытий.

Известны методы измерения степени черноты поверхностей, основанные на сопоставлении стационарных температур исследуемого и эталонного образцов, степень черноты последнего известна [9]. Недостатком указанной группы методов является большое время, необходимое для выхода образцов на стационарный тепловой режим. Известны также методы, основанные на регистрации темпов охлаждения исследуемых образцов в криогенно-вакуумных

* Эмаль АК-512. Технические условия: ГОСТ 23171-78. М., 1996. 10 с.

камерах [10]. Однако процесс охлаждения протекает медленно и характеризуется существенно нелинейным изменением интенсивности лучистой теплоотдачи во времени, приводящим к значительным погрешностям измерений [11]. Авторами настоящей статьи в работе [12] предложен лишенный указанных недостатков метод, основанный на регистрации темпов нагрева образцов (метод монотонного нагрева [13]).

В настоящей работе описан упрощенный вариант метода [12]. Предлагаемый вариант позволяет:

- обеспечить максимальную скорость измерений;
- для упрощения процедуры измерений использовать один электронагреватель с постоянной мощностью тепловыделений;
- определять степень черноты каждого конкретного покрытия в заданном температурном диапазоне;
- обеспечить минимально возможную погрешность измерений.

Для достижения указанных качественных показателей необходимо на основе теоретических исследований определить максимальную скорость измерений, заданный температурный диапазон с указанием минимальных и максимальных температур и минимальную погрешность измерений.

Физическая модель устройства. В вакуумной камере на тонкой нити к верхней части криостатируемого цилиндрического экрана подвешивается измерительный узел, состоящий из двух плоскопараллельных тонких пластин, обращенных покрытиями наружу — в сторону экрана. Между пластинами устанавливается пленочный электрический нагреватель. На пластины устанавливаются датчики, контролирующие температуру пластин. Перед проведением измерений внутренняя полость измерительной установки вакуумируется, после чего экраны охлаждаются до заданного температурного уровня. После охлаждения измерительного узла до температуры криогенного экрана подается постоянная электрическая мощность на нагреватель.

В физической и математической моделях принимаются допущения:

- 1) полная теплоемкость нагревателя мала по сравнению с полной теплоемкостью пластин с покрытиями;
- 2) полная теплоемкость покрытий мала по сравнению с полной теплоемкостью пластин, при малой толщине;
- 3) электрическая мощность расходуется на нагрев каждой из пластин в равной мере;
- 4) тепловая мощность расходуется только на нагрев пластин, что может быть обеспечено использованием тонкой нити подвеса и тонких элементов (в расчетах учитывается теплоотдача излучением от пластин с покрытиями к криогенному экрану);
- 5) коэффициент облученности между каждой из пластин и криогенным экраном равен единице, что может быть обеспечено при малых линейных размерах пластин по сравнению с размерами экранов;
- 6) теплоотдача от пластин к экрану осуществляется только излучением, что достигается вакуумированием внутренней полости (давление не более 10^{-5} мм рт. ст.) [5].

Первое и второе допущения находятся в некотором противоречии с требованием к минимальной полной теплоемкости и соответственно к массе пластин для обеспечения их достаточно быстрого нагрева. Анализ характеристик пленочных нагревателей и покрытий показал, что толщина пластин должна составлять 1—3 мм.

Форма пластин не имеет принципиального значения, но в дальнейших расчетах образцы считаются тонкими круглыми дисками.

Математическая модель. В нестационарном тепловом режиме уравнение теплового баланса исследуемого образца совместно с начальным условием может быть представлено в виде

$$C \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon S \sigma (T^4 - T_s^4) = P; \quad T(\tau = 0) = T_s, \quad (1)$$

где C — полная теплоемкость образца; T — текущее значение температуры поверхности образца; τ — текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева; ε — степень черноты покрытия; S — площадь поверхности одного образца; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана; T_s — температура окружающей среды, равная температуре криогенного экрана; P — половина мощности электронагревателя, расходуемая на нагрев одного исследуемого образца.

Уравнение (1) можно представить в виде суммы удельных тепловых потоков:

$$c_0 \Delta \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) = Q, \quad (2)$$

где c_0 — объемная теплоемкость материала пластины (Вт/(м³К)); Q — удельная мощность тепловыделений, равная поверхностной плотности мощности, поступающей от электронагревателя к пластине.

Если в уравнении (1) может задаваться полная мощность тепловыделений электронагревателя, и тогда используются полная теплоемкость обеих пластин и их суммарная площадь поверхности, то в уравнении (2) задаются удельная мощность, которая может относиться к одной пластине, и толщина одной пластины.

В дальнейших расчетах предполагалось, что в качестве материала пластин используется медь, удельная теплоемкость которой [14] при 20—300 К составляет:

$$c(T) = -0,17905 \cdot 10^{-8} T^5 + 0,14714 \cdot 10^{-5} T^4 - 0,41802 \cdot 10^{-3} T^3 + 0,04486 T^2 + 1,6787 T - 41,059. \quad (3)$$

Объемная теплоемкость определяется через плотность меди: $c_0 = \gamma c(T)$, где $\gamma = 8930$ кг/м³. Начиная с температуры 300 К и выше объемная теплоемкость меди принималась постоянной.

Связь между мощностью электронагревателя и удельной мощностью описывается формулой

$$P = QS; \quad S = 2\pi r^2, \quad (4)$$

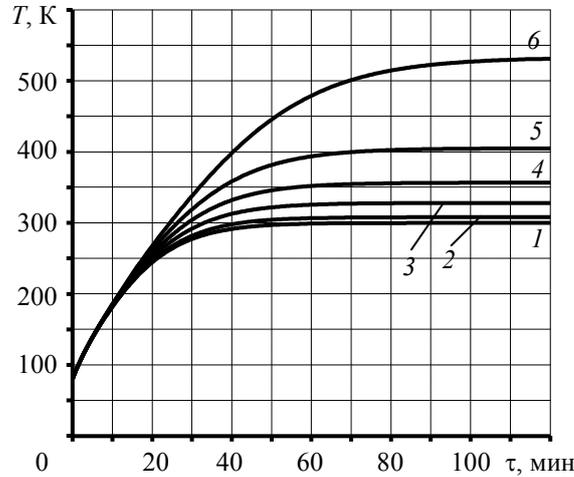
где r — радиус образца. При $r = 0,01$ м $S = 2,28 \cdot 10^{-4}$ м².

Результаты расчетов. Исследования проводились для $T_s = 20$ —150 К. В результате расчетов установлено, что при 20 К начальный участок роста температур оказался существенно нелинейным, это объясняется зависимостью удельной теплоемкости от температуры (3) при низких температурах. В диапазоне от 80 К и выше на начальном временном участке (до 20 мин) температура образцов растет пропорционально времени. Поэтому дальнейшие расчеты проводились для $T_s = 80$ и 150 К.

Мощность электронагревателя выбиралась такой, чтобы образец со степенью черноты покрытия $\varepsilon = 1$ в стационарном тепловом режиме имел температуру 300 К. Это рабочее значение мощности электронагревателя определялось из решения уравнения (1) для стационарного теплового режима. В случае $T_s = 80$ К принималась мощность для нагрева одного образца 0,1435 Вт, при этом полная мощность нагревателя 0,287 Вт. В расчетах с использованием уравнения (2) принималось $Q = 457$ Вт/м². Для температуры экрана 150 К общая мощность составляла 0,27 Вт, а удельная мощность 430,6 Вт/м².

На рисунке представлены зависимости температуры исследуемого образца (его начальная температура равна температуре экрана 80 К) от времени (кривая 1 — $\varepsilon=1$; 2 — 0,9; 3 — 0,7; 4 — 0,5; 5 — 0,3; 6 — 0,1).

Рисунок наглядно демонстрирует недостатки стационарного метода: при постоянной мощности нагревателя стационарные значения температуры образцов ($\varepsilon \leq 0,1$) превысят 500 К. Это подтверждает сложность измерения степени черноты поверхности в стационарном тепловом режиме. Кроме того, для одной процедуры измерения требуется не менее двух часов. Это справедливо и для начальной температуры экрана 150 К.



Важно отметить, что на начальной стадии нагрева кривые, по крайней мере в масштабе рисунка, практически сливаются. Однако для поиска метода определения степени черноты при монотонном нагреве образцов целесообразно рассмотреть начальный участок нагрева (примерно до 20 мин) более подробно.

В пределах $\tau = 10\text{—}20$ мин зависимости температур образцов от степени черноты их покрытий линейны и с высокой точностью описываются соотношениями вида

$$T = T_0 - \Delta T \varepsilon, \quad (5)$$

где T_0 и ΔT — коэффициенты аппроксимации.

В таблице приведены значения T_0 и ΔT для образца из меди толщиной 1 мм, также приведены максимальные погрешности (δ_m) описания реальных зависимостей $T(\varepsilon)$ линейными функциями вида (5). Эти зависимости получены соединением крайних точек $T(\varepsilon=0)$ и $T(\varepsilon=1)$ прямой линией. Такой подход обеспечивает точность определения температуры образца с различными степенями черноты в заданный момент времени.

τ , мин	$T_s = 80$ К			$T_s = 150$ К		
	T_0 , К	ΔT , К	δ_m , %	T_0 , К	ΔT , К	δ_m , %
10	186,2	4,35	0,05	233,8	9,34	0,15
15	229,6	12,53	0,2	272,3	22,50	0,5
20	269,5	26,25	0,6	306,5	41,85	1,4

При обработке результатов экспериментальных исследований степень черноты следует определять по формуле, вытекающей из (5):

$$\varepsilon = \frac{T_0 - T}{\Delta T}. \quad (6)$$

Из таблицы видно, что определяемые при $T_s = 80$ К значения ε на десятой минуте соответствуют $\approx 182\text{—}186$ К, на пятнадцатой — $217\text{—}230$ К, а на двадцатой — $243\text{—}270$ К. Это позволяет оценить зависимость степени черноты от температуры в случае проведения реального эксперимента. При $T_s = 150$ К рабочий температурный диапазон расширяется до 300 К.

Необходимо отметить, что уменьшение продолжительности нагрева образцов приводит к существенному возрастанию погрешности измерений. Например, при $T_s = 80$ К к первой минуте $\Delta T < 0,03$ К, а к пятой — $< 0,8$ К, что препятствует практическим измерениям.

Закключение. В настоящей статье изложена теория метода измерения степени черноты покрытий, позволяющего на порядок снизить время проведения эксперимента по сравнению со стационарными методами измерений. При затрате мощности электрической энергии на нагрев образцов не более десятых долей ватта в основном энергия расходуется на криостатирование экранов и вакуумирование внутренней полости экспериментальной установки. Эти затраты существенно уменьшаются за счет снижения времени на проведение одного эксперимента.

Определение степени черноты покрытия по формуле (6) на основании измеренных температур через 10—20 мин после начала нагрева при толщине образцов 1 мм осуществляется с весьма высокой точностью (погрешность не превышает 1 %, за исключением случая $T_s = 150$ К и $\tau = 20$ мин — см. таблицу). Если степень черноты исследуемого покрытия зависит от температуры, погрешность ее определения тем меньше, чем меньше ΔT . В этом случае в соответствии с данными таблицы наименьшие погрешности измерений будут при минимальном времени измерения. Однако при $\tau < 5$ мин существенно возрастает погрешность, потому что величина ΔT крайне мала и трудноизмерима.

Ограничением предложенного метода является существенная зависимость удельной теплоемкости материала от его температуры в криогенной области. При этом начальный участок роста температур нелинеен. В рассмотренном случае используемых образцов из меди нижней границей рабочих температур следует считать 80 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lienhard J. H. IV, Lienhard J. H. V. A heat transfer textbook. Cambridge, MA, Phlogiston Press, 2008.
2. Ekkert E. R. G., Drake R. M. jr. Analysis of Heat and Mass Transfer. Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C., 1987.
3. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
4. Ташилькова-Бушкевич И. И. Физика. Ч. 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства веществ. Минск, 2008. 182 с.
5. Гуцин В. Н. Основы устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
6. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 223 с.
7. Малоземов В. В., Кудрявцева Н. С. Системы терморегулирования космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 112 с.
8. Пат. 2248954С2 РФ. Состав терморегулирующего покрытия / В. В. Горбачева, Л. И. Бушева, П. В. Рассказов и др. Опубл. 27.03.2005. Бюл. № 9.
9. Пат. 2510491 РФ, МПК G01J5/12 (2006.01). Способ измерения степени черноты / Е. В. Лаповок, М. М. Пеньков, Д. А. Слинченко, И. А. Уртминцев, С. И. Ханков. Приоритет от 11.01.2012, опубл. 27.03.2014. Бюл № 9.
10. А. с. СССР № 770333. Способ измерения степени черноты твердых тел / В. Н. Жигалов, Ж. П. Милкиэль. Опубл. 20.11.2005. Бюл. № 32.
11. Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта в условиях его лучистого теплообмена с окружающей средой // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 3. С. 56—60.
12. Пат. 2521131 РФ, МПК G01J5/12 (2006.01). Способ и устройство для измерения степени черноты / Е. В. Лаповок, М. М. Пеньков, Д. А. Слинченко, И. А. Уртминцев, С. И. Ханков. Приоритет от 11.01.2012, опубл. 27.06.2014. Бюл № 18.
13. Платунов Е. С., Баранов И. В., Буровой С. Е., Курепин В. В. Теплофизические измерения. СПб: СПбГУНиТП, 2010. 738 с.
14. Малков М. П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.

Сведения об авторах

- Евгений Владимирович Лаповок** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, отдел 43; старший научный сотрудник; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Дмитрий Александрович Мосин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра 12; начальник кафедры
- Максим Михайлович Пеньков** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского; начальник академии
- Игорь Александрович Уртминцев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра 12; E-mail: urt_eg@mail.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, отдел 43; старший научный сотрудник

Рекомендована
ВКА

Поступила в редакцию
01.12.15 г.

Ссылка для цитирования: Лаповок Е. В., Мосин Д. А., Пеньков М. М., Уртминцев И. А., Ханков С. И. Измерение степени черноты поверхностей образцов методом монотонного нагрева // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 4. С. 311—316.

**MEASURING DEGREE OF BLACKNESS OF SAMPLE SURFACE
BY THE MONOTONIC HEATING METHOD**

**E. V. Lapovok, D. A. Mosin, M. M. Pen'kov,
I. A. Urtmintsev, S. I. Khankov**

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: leva0007@rambler.ru*

A method for measuring blackness degree of sample surface in a small cryogenic-vacuum chamber is proposed. Physical and mathematical models of the measuring unit are described. The operation temperature range for blackness degree measurement is defined by the temperature of the cryogenic screen, the film electrical heater power, and duration of heating process. It is shown that for copper samples of 1 mm thick and 2 cm diameter at consumed electric power of a few tenths of a Watt and the screen temperatures from 80 to 150 K, the minimal measurement error is achieved at the processing time from 10 to 20 minutes. The proposed method is reported to reduce the processing time for blackness measurement for two orders of magnitude as compared with measurement in stationary thermal mode. In the proposed method, the specified constant value of the power depends slightly on initial temperature of the sample. An important advantage of the method consists in significant saving of energy consumption for the screen cryostatting due to reduction of the time of elementary measurement.

Keywords: blackness degree, surface, monotonic heating method, radiative heat exchange, cryogenic-vacuum chamber, flow-through cryostat system

Data on authors

- Evgeny V. Lapovok** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department 43; Senior Scientist; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Dmitry A. Mosin** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department 12; Head of the Department
- Maxim M. Pen'kov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Head of the Academy
- Igor A. Urtmintsev** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department 12; E-mail: urt_eg@mail.ru
- Sergey I. Khankov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department 43; Senior Scientist;

For citation: Lapovok E. V., Mosin D. A., Pen'kov M. M., Urtmintsev I. A., Khankov S. I. Measuring degree of blackness of sample surface by the monotonic heating method // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 4. P. 311—316 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-4-311-316