

# ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, НАГРЕТЫХ ОТ 100 ДО 250 °С

А.С. Ильин \* <sup>1</sup>, А.В. Гусев<sup>1</sup>, К.А. Маилян<sup>1</sup>, А.В. Глушников<sup>1</sup>, А.В. Киселев<sup>1</sup>,  
А.В. Качанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 19.06.2024  
Одобрена после рецензирования 02.07.2024  
Принята к публикации 05.07.2024

## Аннотация

В данной статье исследуется пространственное распределение интегрального коэффициента излучения ( $\varepsilon_T$ ) материалов, нагретых до температур от 100 до 250 °С. Основное внимание уделено изменению этого коэффициента в зависимости от угла падения излучения ( $\varphi$ ). Для измерений был разработан специальный стенд, позволяющий фиксировать  $\varepsilon_{T\varphi}$  с высокой точностью.

В качестве исследуемых материалов использовались полированная медная поверхность, шлифованная медная поверхность и чёрные аэрозольные краски ABRO и MOTIP.

Результаты измерений показывают, что для полированной медной поверхности максимальные значения  $\varepsilon_{T\varphi}$  наблюдаются при углах  $\pm 10^\circ$ , после чего коэффициент плавно снижается до значения 0,3 при углах  $\pm 70^\circ$ . Для шлифованной медной поверхности  $\varepsilon_{T\varphi}$  остаётся равным 1 до углов  $\pm 40^\circ$ , затем снижается до 0,47 при углах  $\pm 70^\circ$ . Для аэрозольных красок ABRO и MOTIP распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$  сходно: при углах до  $\pm 20^\circ$  коэффициент равен 1, затем уменьшается до 0,2 (ABRO) и 0,1 (MOTIP) при углах  $\pm 80^\circ$ .

Полученные результаты позволяют лучше понять особенности ИК излучения различными материалами и могут быть полезны для их практического применения в оптических и тепловых измерениях.

**Ключевые слова:** пространственное распределение интегрального коэффициента излучения  $\varepsilon_{T\varphi}$ , индикатриса, неисключённая систематическая погрешность, с.к.о., погрешность измерения, приёмник оптического излучения, сигнал с приёмника

EDN WCAGHF

doi:[10.24412/2949-0553-2024-311-12-24](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2024-311-12-24)

## Актуальность исследования

Измерение угловых характеристик интегрального коэффициента излучения ( $\varepsilon_T$ ) является важным аспектом для оптимизации процессов излучательного теплопереноса в инженерных приложениях. Понимание пространственного распределения  $\varepsilon_T$  позволяет улучшать тепловые экраны, радиаторы, работающие в условиях вакуума, так как основным механизмом теплопередачи в данных условиях является излучение. В данной работе исследуется изменение  $\varepsilon_T$  в зависимости от угла падения излучения ( $\varphi$ ) для материалов, нагретых до 100-250 °С, с использованием специально разработанного измерительного стенда, обеспечивающего высокую точность. Новизна исследования заключается в детальном анализе углового распределения  $\varepsilon_T$  ИК излучения для различных материалов, что обеспечивает более точные данные для инженерных расчетов и моделирования сложных систем.

## Введение

Интегральный коэффициент излучения  $\varepsilon_T$  является коэффициентом пропорциональности в выражении закона Стефана – Больцмана:

\* Автор, ответственный за переписку: Александр Семёнович Ильин, [iliin876@gmail.com](mailto:iliin876@gmail.com)

$$M = \varepsilon_T \sigma T^4, \tag{1}$$

где  $M$  – энергетическая светимость реального тела,

$\sigma$  – постоянная Стефана -Больцмана,

$T$  – температура тела, К,

$\varepsilon_T$  – интегральный коэффициент излучения, показывает, во сколько раз светимость реального тела с температурой  $T$ , отличается от светимости АЧТ с такой же температурой.

Результат измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения  $\varepsilon_{T\varphi}$  определяется в относительных единицах отношением:

$$\varepsilon_{T\varphi} = U_\varphi / U_{\varphi=0}, \tag{2}$$

где  $U_{\varphi=0}$  – сигнал с приёмника излучения при угле падения потока излучения  $\varphi = 0^\circ$  к поверхности;  $U_\varphi$  – сигнал с приёмника излучения при угле падения потока излучения, равном  $\varphi$  к поверхности.

Если угол падения  $\varphi = 0^\circ$ , то  $\varepsilon_{T\varphi} = \varepsilon_{Tn}$ ,

где  $\varepsilon_{Tn}$  – значение коэффициента излучения, измеренное при угле падения  $\varphi = 0^\circ$ ;

$\varepsilon_{T\varphi}$  – значение коэффициента излучения, измеренное при угле падения  $\varphi$ .

Существует несколько способов определения  $\varepsilon_{Tn}$ .

1 – через спектральный коэффициент отражения в направлении нормали  $\rho_n(\lambda)$ , который определяется экспериментально, например, с помощью спектрофотометров, а затем, для непрозрачных тел, рассчитывается по выражению:

$$\varepsilon_n(\lambda) = 1 - \rho_n(\lambda);$$

2 – аналитический, позволяющий вычислять значения  $\rho_n(\lambda)$ , если при этом его оптические постоянные известны; наиболее простым случаем является направление по нормали [1, 2].

Значения  $\rho_n(\lambda)$  по нормали для непрозрачных диэлектриков определяется формулой Френеля

$$\rho(\lambda)_n = \frac{[1 - n(\lambda)]^2}{[1 + n(\lambda)]^2}, \tag{3}$$

где  $n$  – спектральный коэффициент преломления.

Следует учитывать, что в металлах отражение зависит от тонкого поверхностного слоя окислов.

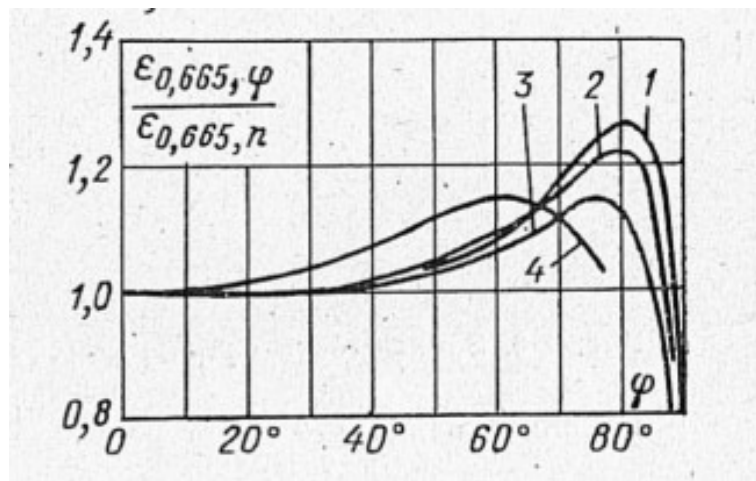


Рисунок 1 – Относительное изменение спектрального коэффициента излучения для  $\varepsilon(\lambda)_{T\varphi}$  для  $\lambda = 0,665$  мкм для некоторых металлов: 1 – платина, 2 – манганин, 3 – вольфрам, 4 – железо [3, 5]

Для металлов с неокисленной поверхностью коэффициент излучения  $\varepsilon_n(\lambda)$  можно определять аналитически, используя приближённые эмпирические формулы, например, аппроксимацию Друде:

$$\varepsilon_n(\lambda) = 0,365 \sqrt{\frac{r_T}{\lambda}},$$

где  $r_T$  – удельное сопротивление при температуре  $T$ , Ом·м;

$\lambda$  = длина волны, мкм.

Имеется ряд других аппроксимаций, позволяющих получать более точные значения  $\varepsilon_n(\lambda)$  для различных диапазонов длин волн и температур.

Почти для всех металлов  $\varepsilon_{T\varphi} \approx \varepsilon_{Tn}$  до угла  $\varphi \approx 40^\circ$ . Эта зависимость показана на рисунке 1. После  $40^\circ$  идёт увеличение отражения до  $\varepsilon_{T\varphi}/\varepsilon_{Tn} \approx 1,2$  до  $80^\circ$  и спад до 0 к  $90^\circ$  [3,4].

Диэлектрики имеют другое, нежели металлы, пространственное распределение излучения [5]. На рисунке 2 показана зависимость  $\varepsilon_{T\varphi} = f(\varphi)$  для некоторых диэлектриков.

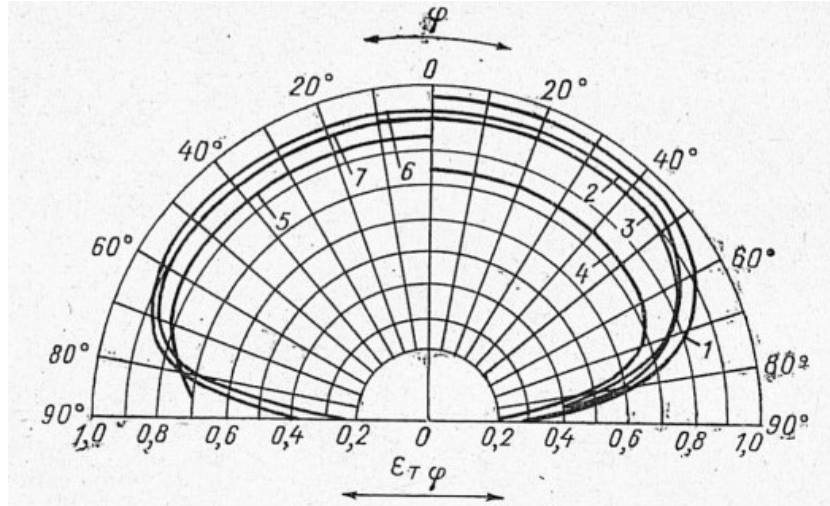


Рисунок 2 – Зависимость  $\varepsilon_{T\varphi} = f(\varphi)$  для некоторых диэлектриков с матовой поверхностью: 1 – лёд (мокрый), 2 – стекло, 3 – глина, 4 – окись меди, 5 – корунд, 6 – древесина, 7 – бумага

Коэффициент излучения диэлектриков достигает максимального значения при  $\varphi = 0^\circ$  и от  $\varphi = 60^\circ$  начинает более или менее плавно уменьшаться, приближаясь к нулю, когда  $\varphi$  стремится к  $90^\circ$ .

Из данного обзора следует, что зависимость  $\varepsilon_{T\varphi} = f(\varphi)$  может быть определена только экспериментально. Если температура поверхности исследуемых образцов не превышает  $200^\circ$ , то основная доля потока излучения будет находиться в диапазоне длин волн от 5 до 25 мкм, кроме того, величина потока излучения, приходящего на приёмную площадку приёмника, будет находиться в диапазоне от единиц микроватт до 200 мкВт. Поэтому необходимо иметь неселективный, высокочувствительный и достаточно быстрый приёмник излучения.

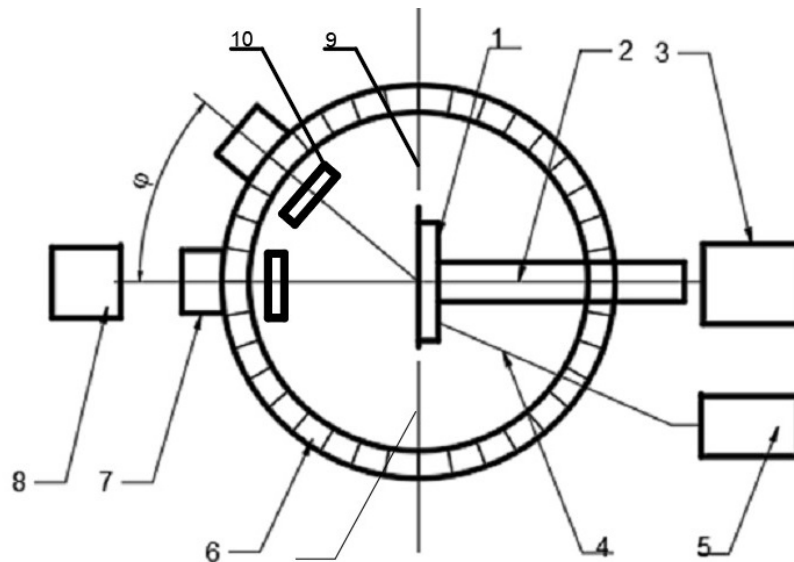


Рисунок 3 – Блок-схема стенда для измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения: 1 – исследуемый образец, 2 – нагреватель образца, 3 – блок питания нагревателя, 4 – термопара, 5, 8 – микровольтметр АРРА-109, 6 – поворотный столик с лимбом, имеющим разрешение  $1^\circ$ , 7 – приёмник оптического излучения типа ТП-1, 9 – экран, 10 – заслонка

Исходя из этих требований был разработан измерительный стенд, блок-схема которого приведена на рисунке 3.

## 1. Стенд для измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения $\varepsilon_T$

Результат измерения пространственного распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$  определяется по выражению (2).

Основные характеристики термоэлектрического приёмника излучения типа ТП-1 приведены в таблице 1.

### 1.1. Термоэлектрический приёмник типа ТП-1

Термоэлектрический приёмник типа ТП-1 предназначен для измерения постоянных потоков оптического излучения сплошного спектра в спектральном диапазоне длин волн от 0,2 до 25 мкм и в диапазоне энергетической освещённости от 1 до 2000 Вт/м<sup>2</sup>. Температурный коэффициент преобразования положителен и равен:

$\alpha_T = 1,10^{-3}$  [1/град] в диапазоне температур от 5 до 40°C.

При температуре окружающей среды, отличной от 20°C, коэффициент преобразования рассчитывается по формуле:

$$K_T = K_{20}[1 + 1 \cdot 10^{-3}(t - 20)]$$

Таблица 1 – Характеристики приёмника ТП-1

Характеристика	Размерность	Значение
Размер приёмной площадки	мм x мм	4 x 1
Сопротивление	Ом	$0,3 \pm 0,2$
Коэффициент преобразования	В/Вт	$0,5 \pm 0,2$
Диапазон освещённостей	Вт/м <sup>2</sup>	10 - 2000
Постоянная времени	с	0,4 – 0,6
Обнаружительная способность, D*	Вт · Гц <sup>-0,5</sup> · см <sup>0,5</sup>	$(7,5 - 8) \cdot 10^8$
Время выхода сигнала на уровень 0,99 U <sub>max</sub>	с	$\leq 3$
Граница основной погрешности	%	3,5
Габаритные размеры		
высота	мм	9
диаметр	мм	15

### 1.2. Устройство исследуемых образцов

Исследуемое покрытие наносится на медное основание, устройство и крепление которого к нагревателю показано на рисунках 4 и 5.

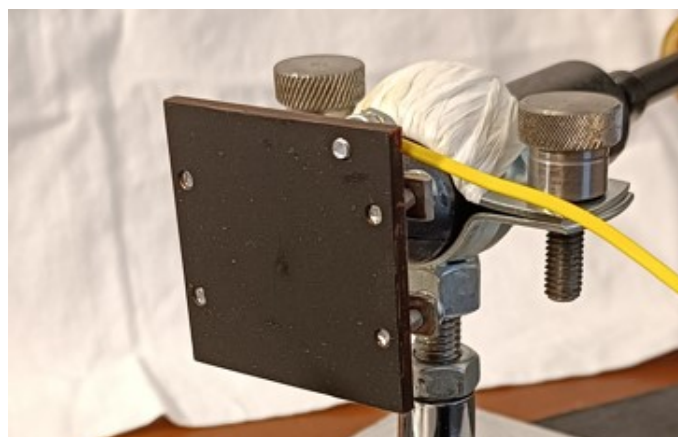


Рисунок 4 – Конструкция подложки

Размер подложки: 40x40x3, материал – медь. Крепление подложки к нагревателю показано на рисунке 5.

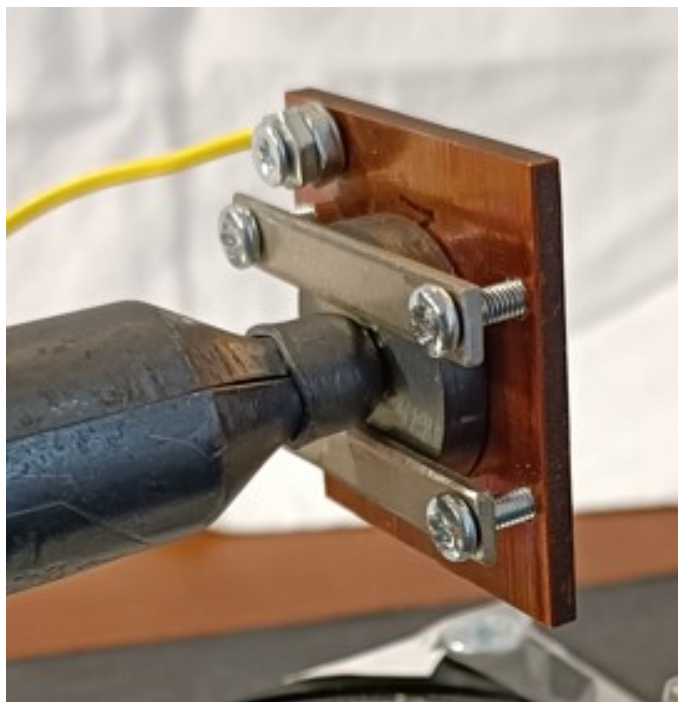


Рисунок 5 – Крепление подложки к нагревателю

Крепление подложки к нагревательному элементу производится винтами М3 при через стальные полоски. Термопара крепится к подложке винтом М3.

В соответствии с блок-схемой измерительного стенда, рисунок 3, был разработан стенд, приведенный на фото рисунка 6.

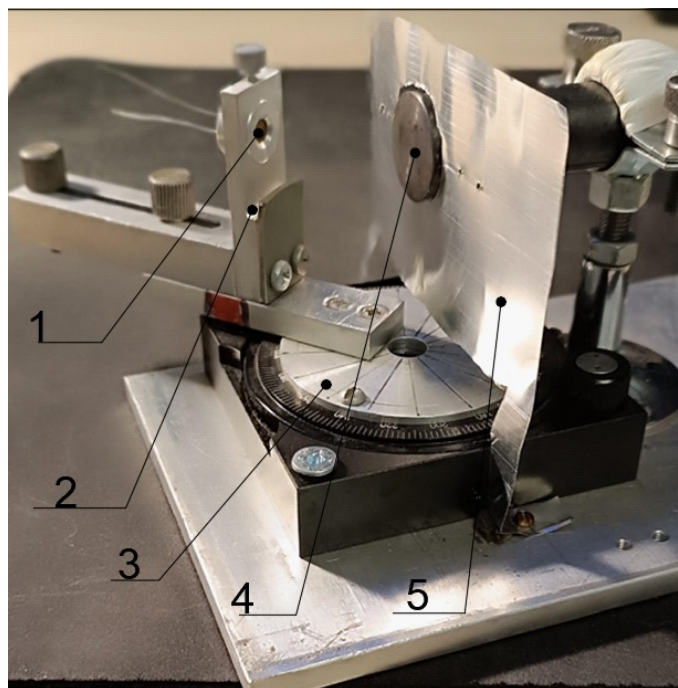


Рисунок 6 – Стенд для измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения в диапазоне длин волн от 5 до 25 мкм: 1 – приёмник излучения типа ТП-1, 2 – паз для установки заслонки, 3 – оптический поворотный столик, 4 – нагреватель, 5 – радиационный экран



## 2. Результаты измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения $\epsilon_T = f(\varphi)$

Были исследованы следующие материалы:

- 1 – полированная медная подложка без покрытия;
- 2 – медная подложка шлифованная, без покрытия;
- 3 – аэрозольная краска МОТИР на медной шлифованной подложке;
- 4 – аэрозольная краска АВРО на медной шлифованной подложке.

### 2.1. Методика измерения

При закрытой заслонке (10) измерялся темновой сигнал с приёмника –  $U_T$ , затем при открытой заслонке измерялся сигнал от нагретой пластины –  $U_C$ , и результирующий сигнал вычислялся по формуле:

$$\Delta_i = U_C - U_T. \tag{4}$$

Для каждого угла измерялось по пять значений  $\Delta$ , и рассчитывалось среднее арифметическое по результатам пяти измерений. Для каждого угла вычислялось  $\epsilon_{T\varphi}$  по формуле:

$$\epsilon_{T\varphi} = \Delta_i / \Delta_{\text{сред. } i}. \tag{5}$$

Результаты измерений каждого образца записывались в таблицу, в которой указывались особенности и все сопутствующие данные. По результатам, приведенным в таблице, строились диаграммы углового распределения  $\epsilon_{T\varphi}$ .

#### 2.1.1. Шлифованная медная подложка без покрытия

Температура подложки поддерживалась  $(160 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

В таблице 2 приведены результаты измерения сигналов с приёмника ТП-1, а также расчёта с.к.о. арифметического результата измерения  $S_{\bar{x}}$  и относительного значения  $S_{\bar{x}_{\text{отн.}}}$  [%]. Эти составляющие рассчитывались по формулам (7)– (9).

На рисунке 7 приведена индикатриса распределения  $\epsilon_{T\varphi}$  шлифованной медной пластины, нагретой до температуры  $160^\circ\text{C}$ .

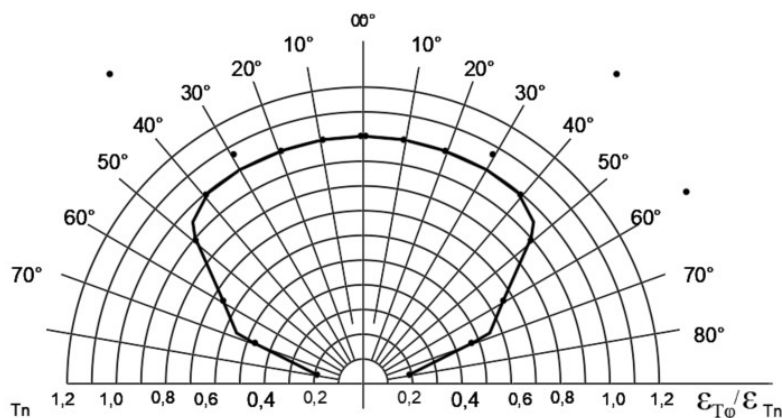


Рисунок 7 – Угловое распределение  $\epsilon_{T\varphi}$  шлифованной медной поверхности при температуре  $160^\circ\text{C}$

Из полученных результатов следует:

- 1 – максимальные значения  $\epsilon_{T\varphi}$  находятся при углах  $\pm 40^\circ$ ;
- 2 – затем идёт уменьшение  $\epsilon_{T\varphi}$  до значения 0,2 при углах  $\pm 80^\circ$ ;
- 3 – относительное с.к.о., вычисленное для каждого угла, находится в интервале от 2 до 9 процентов.

Таблица 2 – Результаты измерения сигналов приёмника оптического излучения типа ТП-1 от нагретой до  $(160 \pm 1)^\circ\text{C}$  медной шлифованной поверхности. Расстояние от поверхности до приёмника равно 53 мм

$U_c$ мкВ	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$
$U_T$	1	1	2	3	5	6	7	8	11
$U_c$	31	29	29	36	32	30	27	22	14
$\Delta_1$	30	30	31	33	27	24	20	14	3
$U_T$	12	13	15	13	15	15	15	15	15
$U_c$	42	42	41	42	42	40	35	27	17
$\Delta_2$	30	29	26	29	27	25	20	12	2
$U_T$	13	12	8	0	-5	-9	-8	-7	-3
$U_c$	42	40	39	32	24	20	15	8	3
$\Delta_3$	29	28	31	32	29	29	23	15	6
$U_T$	-10	-10	-10	-10	-11	-8	-6	-5	-4
$U_c$	20	20	29	27	22	20	12	8	3
$\Delta_4$	30	30	39	37	33	28	18	13	7
$U_T$	-2	-1	-10	-10	-10	-4	-12	-8	5
$U_c$	24	30	13	21	18	14	1	7	1
$\Delta_5$	26	31	23	32	28	25	13	15	4
$\Delta_{\text{сред}}$	29	29,6	28	31,5	29	26	19	14	5
$\varepsilon_{T\varphi} = \frac{\Delta_{\text{сред}}}{U_T}$ $\varphi=I /$ $\Delta_{\text{сред}} \varphi=0$	1,0	1,02	0,97	1,08	1,0	0,9	0,66	0,48	0,17
$S_x$	1,2	0,55	2	1,04	1,1	1,0	1,7	0,6	1,2
$S_{x\text{отн.}} \%$	4	1,8	7	3,3	3,8	4	9	4,3	23

### 2.1.2. Полированная медная поверхность

Результаты измерения сигналов приёмника ТП-1 от нагретой до  $160^{\circ}\text{C}$  полированной медной поверхности сведены в аналогичную таблицу. Расстояние от поверхности до приёмника равно 35 мм. По результатам измерений построена индикатриса распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$ . В целях экономии места таблицы приводится не будут, а будут приведены графики распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$ .

С.к.о. величины сигнала  $S_{\bar{x}_{\text{отн.}}}$  %, измеренного от нагретой до  $160^{\circ}\text{C}$  поверхности полированной медной пластины, больше 15%. Это вызвано малым значением величины потока излучения от полированной поверхности за счёт малой величины излучающей способности.

Расчёт производился по формулам (7)–(9)). На рисунке 8 приведена измеренная индикатриса распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$  от полированной медной пластины, нагретой до температуры  $160^{\circ}\text{C}$ .

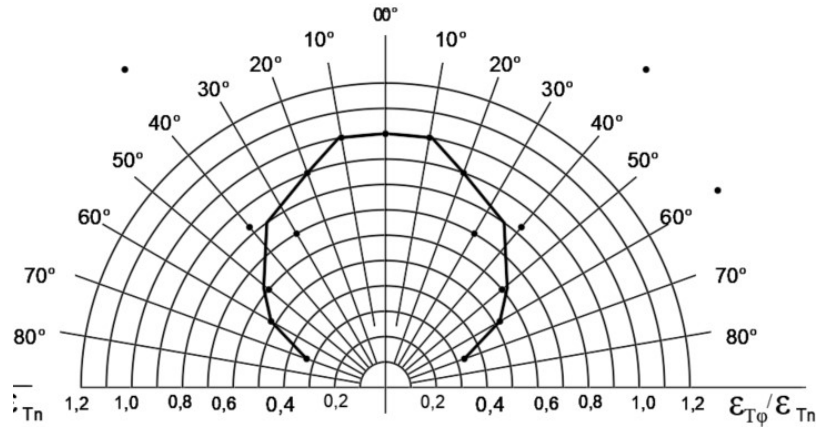


Рисунок 8 – Угловое распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$  полированной медной поверхности при температуре  $160^{\circ}\text{C}$ . Расстояние от поверхности до приёмника равно 35 мм

Из рисунка 8 следует:

- 1 – максимальные значения  $\varepsilon_{T\varphi}$  находятся при углах  $\pm 10^{\circ}$ ;
  - 2 – затем идёт уменьшение  $\varepsilon_{T\varphi}$  до значения 0,3 при углах  $\pm 70^{\circ}$ ;
- Относительное с.к.о., вычисленное для каждого угла, более 15%.

Полученное распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$  полированной медной пластины отличается от распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$ , приведенного на рисунке 1 для металла без окисла. Это отличие вызвано появлением существенного слоя окисла на поверхности полированной меди при температуре  $160^{\circ}\text{C}$ .

### 2.1.3. Аэрозольные чёрные краски MOTIP и ABRO на медной шлифованной подложке

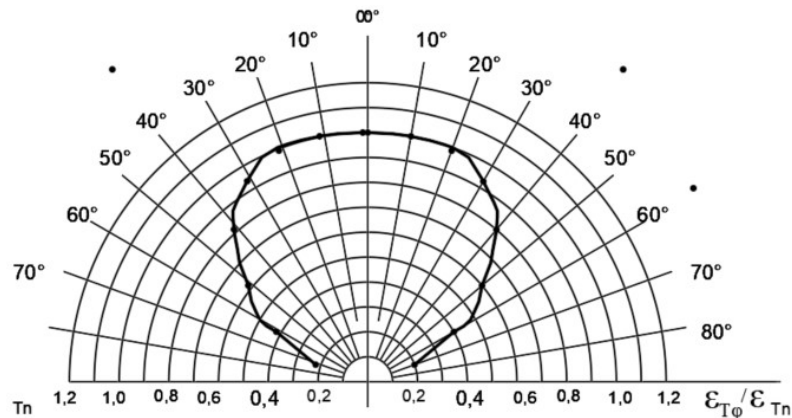


Рисунок 9 – Угловое распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$  краски ABRO, нанесённой на шлифованную медную подложку при температуре  $143^{\circ}\text{C}$ . Расстояние от поверхности до приёмника равно 53 мм

Покрытия из этих красок на медной шлифованной пластине имеют поверхностное сопротивление



более  $R_{\square} > 1,0$  ГОм, что позволяет их отнести к классу диэлектриков. При измерении параметров углового распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$  температура подложки поддерживалась в диапазоне от 135 до 160°C.

Измерения и результаты их обработки выражены в графиках рисунков 9 и 10.

Из результатов измерения 9 следует:

1 – максимальные значения  $\varepsilon_{T\varphi}$  находятся при углах  $\pm 25^\circ$ ;

2 – затем идёт уменьшение  $\varepsilon_{T\varphi}$  до значения 0,2 при углах  $\pm 80^\circ$ ;

3 – относительное с.к.о., вычисленное для каждого угла, находится в интервале от 0,5 до 2 процентов в интервале углов от  $0^\circ$  до  $70^\circ$ .

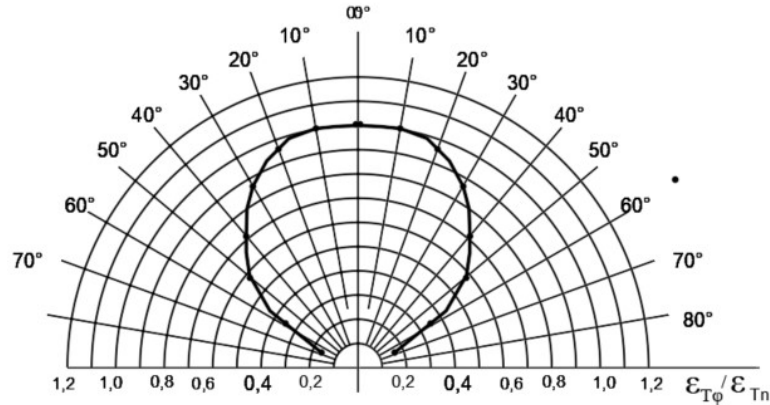


Рисунок 10 – Угловое распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$  краски MOTIP, нанесённой на шлифованную медную подложку при температуре 145°C. Расстояние от поверхности до приёмника равно 53 мм

Из результатов измерений и рисунка 10 следует:

1 – максимальные значения  $\varepsilon_{T\varphi}$  находятся при углах  $\pm 15^\circ$ ;

2 – затем идёт уменьшение  $\varepsilon_{T\varphi}$  до значения 0,1 при углах  $\pm 80^\circ$ ;

3 – относительное с.к.о., вычисленное для каждого угла, находится в интервале от 0,5 до 2 процентов в интервале углов от  $0^\circ$  до  $70^\circ$ .

Выводы

Результаты измерения  $\varepsilon_{T\varphi}$  в диапазоне длин волн от 5 до 25 мкм полированной медной поверхности, шлифованной медной поверхности и чёрных аэрозольных красок MOTIP и ABRO, нанесённых на шлифованные медные подложки, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты угловой зависимости интегральных коэффициентов излучения в диапазоне длин волн от 5 до 26 мкм

$\varphi$	$\pm 0^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 70^\circ$
Медь полированная	1	1	0,9	0,82	0,75	0,61	0,52	0,33
Медь шлифованная	1	1	1	1	1	0,9	0,65	0,47
Краска ABRO	1	1	1	0,93	0,8	0,6	0,4	0,2
Краска MOTIP	1	1	0,95	0,87	0,7	0,6	0,35	0,1

Из таблицы 3 следует:

1 – шлифованная медь имеет наиболее равномерное угловое распределение  $\varepsilon_{T\varphi}$ , которое в диапазоне углов  $\pm 40^\circ$  равно 1,0 и затем начинает постепенно уменьшаться до 0,47 при углах  $\pm 70^\circ$ ;

2 – краски ABRO и MOTIP имеют практически одинаковые распределения  $\varepsilon_{T\varphi}$ , которые в диапазоне углов  $\pm 10^\circ$  равны 1,0, а затем постепенно практически одинаково убывают;

3 – полированная медь имеет  $\varepsilon_{T\varphi}$ , равную 1, до углов  $\pm 10^\circ$ , затем идёт плавное уменьшение до 0,33 при углах  $\pm 70^\circ$ ;

4 – с.к.о. результатов измерения  $\varepsilon_{T\varphi}$  до  $\pm 70^\circ$  не превышает 3%, а погрешность измерения не

превышает  $\pm 10\%$ .

### 3. Методика измерений и расчёта погрешности измерения $\varepsilon_{T\varphi}$

Так как  $\varepsilon_{T\varphi}$  (1) есть результат косвенного измерения, то среднее значение данной величины будет результатом деления средних значений

$$\overline{\varepsilon_{T\varphi}} = \overline{U_\varphi} / \overline{U_{\varphi=0}}. \quad (6)$$

Средние значения указанных величин находим из серии пяти измерений. Результаты этих измерений сводим в таблицу 1. В эту таблицу заносим значения измеренных величин сигналов  $U_T$ ,  $U_c$ ,  $\Delta_i$  для каждого угла, а также их средние значения  $\Delta_{\text{сред}}$ , вносим расчётное значение  $\varepsilon_{T\varphi} = \Delta_i / \Delta_{\text{сред}}$ , и значения с.к.о.  $S_x$ ,  $S_{x \text{ отн.}}\%$ . Приведенные значения рассчитываются по формулам:

$$\Delta_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad (7)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \Delta_{\text{сред}})^2}{(n)(n-1)}}, \quad (8)$$

$$S_{x \text{ отн.}} = \frac{S_x}{\Delta_{\text{сред}}} 100\%. \quad (9)$$

Доверительные границы  $\varepsilon$  случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляются по формуле:

$$\varepsilon = t S_{x \text{ отн.}}, \quad (10)$$

где  $t$  - коэффициент Стьюдента, в нашем случае равный 2,57.

В соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 результаты измерения представляются в виде:

$$\overline{\varepsilon_{T\varphi}} \pm \Delta, P, \quad (11)$$

где  $\Delta$  - граница погрешности оценки измеряемой величины;  
 $P$  - доверительная вероятность, равная, в нашем случае, 0,95.

$$\Delta = K S_\Sigma, \quad (12)$$

где  $K$  - коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и неисключённой систематической погрешности  $\Theta_i$  (НСП).

$S_\Sigma$  - суммарное среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины вычисляются по формуле:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_\Theta^2 + S_{x \text{ отн.}}^2}, \quad (13)$$

где  $S_\Theta$  - среднее квадратическое отклонение НСП, которое, в нашем случае, оценивается по формуле:

$$S_\Theta = \frac{\Theta_\Sigma}{\sqrt{3}}, \quad (14)$$

где  $\Theta_\Sigma$  - границы НСП, которые определяют по формуле:

$$\Theta_\Sigma(P) = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (15)$$

где  $\Theta_i$  - граница  $i$ -й НСП;

$k$  - коэффициент, равный 1,1 для вероятности 0,95. Коэффициент  $K$  (31) определяют по формуле:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_\Sigma}{S_x + S_\Theta}. \quad (16)$$

Определение составляющих н.с.п. ( $\Theta_i$ ) и с.к.о. ( $S_i$ ), входящих в выражения (13 - 16)

В сумму  $\Sigma \Theta_i$  – неисключённых систематических погрешностей входят следующие составляющие:  
 $\Theta_{\text{ТП-1}}$  – н.с.п., обусловленная основной погрешностью приёмника излучения ТП-1,  
 $\Theta_{\text{АРРА-U}}$  – н.с.п., обусловленная основной погрешностью измерительного микровольтметра АРРА-109 в режиме измерения постоянного напряжения;  $\Theta_{\text{АРРА-U}}$   
 $\Theta_{\text{АРРА-T}}$  – н.с.п., обусловленная основной погрешностью измерительного микровольтметра АРРА-109 в режиме измерения температуры.

### 3.1. Определение НСП, связанных с измерениями сигналов с приёмника излучения ТП-1 мультиметром типа АРРА-109

В соответствии с результатами таблицы 3 величины сигналов, выдаваемых приёмником ПОИ-1, находятся в диапазоне от 30 до 200 мкВ. Эти напряжения измерялись мультиметром АРРА-109 на диапазоне 20 мВ.

Предел допускаемой основной абсолютной и относительной погрешности измерения сигналов с приёмника излучения на диапазоне измерения 20 мВ постоянного напряжения мультиметра АРРА-109 определялся по выражению [6]:

$$\Delta = \pm(0,0006 \cdot X = 6k),$$

где  $X$  – измеренная величина, в наших измерениях эта величина имеет значение около  $U_C = 2 \cdot 10^{-4}$  В;  $k$  – значение единицы младшего разряда на данном пределе измерения 20 мВ, равное  $1 \cdot 10^{-6}$  В.

При этих условиях

$$\Delta = \pm(0,0006 \cdot + 6k) = \pm(0,0006 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 60 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) = \pm 6 \cdot 10^{-6} \text{ В.}$$

Относительная основная погрешность при измерении мультиметром АРРА-109 сигнала  $U_C = 2 \cdot 10^{-4}$  В равна:

$$\delta = (\Delta/X) \cdot 100 = \pm(6 \cdot 10^{-6}/2 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 = 3 \text{ \%}.$$

Данная погрешность рассматривается как НСП:  $\Theta_U = \pm 3 \text{ \%}$ .

### 3.2. Определение НСП при измерении температуры

Предел допускаемой основной абсолютной и относительной погрешности измерения сигналов с термопары типа К, используемой для измерения температуры в диапазоне от -100 до 400 °С, с разрешением 0,1 °С, совместно с мультиметром типа АРРА-109, определялся по выражению [6]:

$$\Delta = \pm(0,001X = 30k),$$

где  $X$  – измеряемая температура, равная 150 °С,

$k$  – разрешение, равное 0,1 °С (значение единицы младшего разряда на данном пределе измерения),  
 $\Delta = \pm(0,001X = 30k) = \pm(1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^2 + 30 \cdot 0,1) = \pm 3,15 \text{ °С}$ .

Относительная основная погрешность при измерении мультиметром АРРА-109 температуры 150 °С равна:

$$\delta = \pm(\Delta/X) \cdot 100 = \pm(3,15/150) \cdot 100 = \pm 2 \text{ \%}.$$

Данная погрешность рассматривается как НСП:  $\Theta_t = \pm 2 \text{ \%}$ .

Основные метрологические характеристики стенда, входящие в выражения (8 - 16), приведены в таблице 4.

Итак, граница погрешности измерительного стенда равна  $\pm 10 \text{ \%}$  при доверительной вероятности 0,95.

Результат измерения, например, коэффициент пространственного распределения  $\overline{\varepsilon_{\text{ТФ}}}$  краски АВРО для угла  $\varphi = 30^\circ$ , равен:

$$\varepsilon_{\text{ТФ}=30} = 0,93 \pm 0,093.$$

Погрешность измерения  $\varepsilon_{\text{ТФ}}$  для углов от 60 до 80° будет увеличиваться за счёт увеличения с.к.о.  $S_{\varepsilon_{\text{ТФ}} > 60}$ . При необходимости эти погрешности можно рассчитать для каждого образца покрытий, используя результаты измерений, приведённые в таблицах типа 1.

Таблица 4 – Основные метрологические характеристики стенда

Составляющие основной погрешности	Обозначение	Значение %
Граница основной погрешности	$\Delta_{0,95}$	10
НСП от величины измеряемого напряжения	$\Theta_U$	3
НСП от величины измеряемой температуры	$\Theta_t$	2
Границы НСП	$\Theta_{\Sigma}(P)$	6,8
СКО НСП	$S_{\Theta}$	4,0
СКО суммарное	$S_{\Sigma}$	2,0
Доверительные границы случайной погрешности	$\varepsilon$	5,0
Коэффициент К	К	2,0
СКО относительное с образца	$S_{\varepsilon\varphi}$	2,0
Основная погрешность приёмника ТП-1	$\Theta_{\text{ТП-1}}$	4,0

## 5. Заключение

Результаты проведенного исследования позволили получить детальные данные о пространственном распределении интегрального коэффициента излучения ( $\varepsilon_T$ ) для различных материалов при углах падения излучения от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ . Полученные данные подтверждают, что угловое распределение  $\varepsilon_T$  существенно зависит от материала поверхности и ее обработки. Полированная медная поверхность показала наибольшую равномерность распределения  $\varepsilon_T$  до углов  $\pm 40^\circ$ , после чего коэффициент начинает снижаться. Шлифованная медная поверхность и покрытия из аэрозольных красок АВРО и МОТИР продемонстрировали схожие угловые зависимости с наибольшими значениями при малых углах и значительным уменьшением при больших углах падения.

Для полированной медной поверхности максимальные значения  $\varepsilon_{T\varphi}$  наблюдались при углах  $\pm 10^\circ$ , после чего коэффициент плавно снижался до 0.3 при углах  $\pm 70^\circ$ . Шлифованная медная поверхность имела  $\varepsilon_{T\varphi}$ , равным 1, до углов  $\pm 40^\circ$ , затем коэффициент снижался до 0.47 при углах  $\pm 70^\circ$ . Аэрозольные краски АВРО и МОТИР показали, что  $\varepsilon_{T\varphi}$  для углов до  $\pm 20^\circ$  был равен 1, затем снижался до 0.2 (АВРО) и 0.1 (МОТИР) при углах  $\pm 80^\circ$ .

Полученные результаты подчеркивают важность выбора материала и его обработки для оптимизации тепловых характеристик в инженерных приложениях. Различия в угловом распределении  $\varepsilon_T$  указывают на то, что для достижения наилучших тепловых характеристик необходимо учитывать как тип материала, так и его поверхность. Полированные и шлифованные поверхности, а также различные типы покрытий, такие как аэрозольные краски, демонстрируют значительные вариации в распределении излучательной способности, что влияет на эффективность теплопередачи.

Таким образом, полученные данные о пространственном распределении  $\varepsilon_T$  могут быть использованы для оптимизации тепловых экранов, радиаторов и других теплотехнических систем, работающих в условиях вакуума, где основным механизмом теплопередачи является излучение. В будущем планируется расширение исследований на других материалах и покрытиях для получения более обширных данных.

## Финансирование

Работа выполнена за счёт внутренних средств ИТПЭ РАН.

## Список литературы

- [1] Свет Д.Я. Температурное излучение металлов и некоторых других веществ. М.: Металлургия, 1964. 134 с.
- [2] McMahon H.O. Thermal radiation from partially transparent reflecting bodies. Journ. Opt. Soc.Amer., 1950. V. 40, N 6, P. 376 – 380.
- [3] Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели / Перевод с польского. Изд-во «Энергия», Ленинградское отделение, 1978. С.19.

- [4] Grober H., Erk S, Grigull U. Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin: Springer Verlag, 1963. 436 pp.
- [5] Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1965. 320 с.
- [6] Мультиметры цифровые APPA -109. Руководство по эксплуатации. Москва 2004. 35 с.

---

## MEASUREMENT OF INTEGRAL EMISSION COEFFICIENTS OF MATERIALS HEATED TO TEMPERATURES FROM 100 TO 250 °C

A.S. Ilyin<sup>\*1</sup>, A.V. Gusev<sup>1</sup>, K.A. Mailyan<sup>1</sup>, A.V. Glushchenkov<sup>1</sup>, A.V. Kiselev<sup>1</sup>,  
A.V. Kachanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

\* iliin876@gmail.com

### Abstract

This paper studies the spatial distribution of the integral radiation coefficient ( $\varepsilon T$ ) of materials heated to temperatures from 100 to 250 °C. The main attention is paid to the variation of this coefficient depending on the angle of incidence of radiation ( $\varphi$ ). A special bench was developed for the measurements, which allows to fix  $\varepsilon T\varphi$  with high accuracy.

Polished copper surface, ground copper surface, and black ABRO and MOTIP aerosol paints were used as the investigated materials.

The measurement results show that for the polished copper surface, the maximum values of  $\varepsilon T\varphi$  are observed at angles of  $\pm 10^\circ$ , after which the coefficient smoothly decreases to a value of 0.3 at angles of  $\pm 70^\circ$ . For polished copper surface  $\varepsilon T\varphi$  remains equal to 1 up to angles of  $\pm 40^\circ$ , then decreases to 0.47 at angles  $\pm 70^\circ$ . For ABRO and MOTIP aerosol paints, the distribution of  $\varepsilon T\varphi$  is similar: at angles up to  $\pm 20^\circ$  the coefficient is 1, then decreases to 0.2 (ABRO) and 0.1 (MOTIP) at angles of  $\pm 80^\circ$ .

**Key words:** spatial distribution of the integral radiation coefficient of the  $\varepsilon T\varphi$ , indicatrix, non-excluded systematic error, S.K.O., measurement error, optical radiation receiver, signal from the receiver

---