

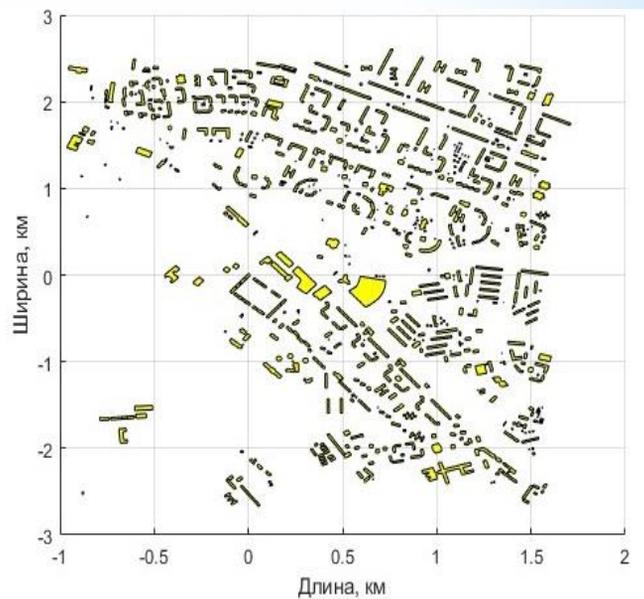
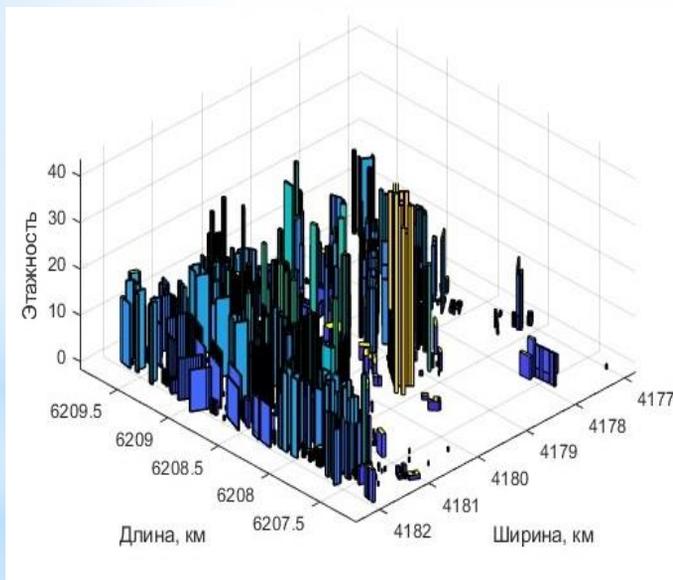


Издательство ИТПЭ РАН

ISSN 2949-0553

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

научный рецензируемый журнал



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А. А. Новиков, К. С. Сычев, М. С. Михайлов

2024

№ 3 (11)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук

Журнал основан в 2022 году

Выпуск № 3 (11)

Современная электродинамика

научный рецензируемый журнал

Под редакцией академика РАН А.Н. Лагарькова

Москва, 2024

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

ISSN 2949-0553

Современная электродинамика

Научный рецензируемый журнал. Издаётся с октября 2022 года.

Выходит один раз в два месяца.

№ 3 (11)

2024

Главный редактор академик РАН А.Н.Лагарьков

Редакционная коллегия: к.т.н. Н.П. Балабуха, к.т.н. К.М. Басков, д.ф.-м.н. А.П. Виноградов, д.ф.-м.н. А.А. Дорофеенко, д.ф.-м.н. В.Н. Кисель, к.ф.-м.н. К.И. Кугель, д.ф.-м.н. А.М. Мерзликин, д.ф.-м.н. А.А. Пухов, д.ф.-м.н. А.Л. Рахманов, д.ф.-м.н. А.В. Рожков, д.ф.-м.н. К.Н. Розанов, к.т.н. И.А. Рыжиков, д.ф.-м.н. А.К. Сарычев, к.ф.-м.н. В.С. Солосин

Адрес редакции:

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 6

тел., факс 8 (495) 484-26-33

эл.почта electrodynamics@mail.ru

Зав. редакцией Е.В. Зеневич

Компьютерная вёрстка: Е.В. Зеневич

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-83666 от 26.07.2022 г.

Подписано в печать 05.07.2024. Тираж 30 экз.

© ИТПЭ РАН, 2024

Содержание номера

1	Вычислительная электродинамика	4
	Новиков А.А., Сычев К.С., Михайлов М.С.	
	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ	4
2	Вопросы экспериментальной электродинамики	12
	Ильин А.С., Гусев А.В., Маилян К.А., Глушников А.В., Киселев А.В., Кача- нов А.В.	
	ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕ- ГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, НА- ГРЕТЫХ ОТ 100 ДО 250 °С	12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.А. Новиков * ^{1,2}, К.С. Сычев², М.С. Михайлов²

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 20.05.2024

Одобрена после рецензирования 03.07.2024

Принята к публикации 05.07.2024

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования распространения радиоволн (РРВ) в условиях городской местности методом пошагового решения параболического уравнения. Разработана программа, которая позволяет на основе данных о геометрии застройки, извлечённых из цифровых карт местности, выполнить моделирование выбранного участка урбанизированной среды и рассчитать в нём распределение поля на любой высоте над поверхностью Земли (ЗП) и в любых сечениях. В качестве эксперимента выбрана область в пределах месторасположения метрополитена «Селигерская». Графики показывают излучение поля антенной, расположенной на крыше здания, обладающего наибольшим количеством надземных этажей, а также отображают зону тени.

Ключевые слова: распространение радиоволн, городская местность, параболическое уравнение, метод факторизации, распределение поля, цифровые карты местности

EDN KUJHBT

doi:[10.24412/2949-0553-2024-311-04-11](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2024-311-04-11)

Введение

Существует множество причин исследования распространения радиоволн в городской среде. Например, при помощи такого исследования решаются задачи расположения базовых станций мобильной связи и расчёта зон максимального покрытия [1]. Однако требуется учёт некоторых особенностей, среди которых стоит отметить довольно частое отсутствие прямой видимости между антеннами, многолучевое распространение, которое приводит к интерференционным замираниям, наличие дифракционных лучей, зона тени и т.д. Необходимо также решать проблему, связанную с отсутствием информации о параметрах среды.

Известны различные методы вычисления напряжённости поля в городе: модель Уолфиш-Икегами, широко используемая на практике методика Окамура – Хата [2, 3]. Несмотря на то, что модели дают хорошие результаты, они требуют больших вычислительных ресурсов. Наиболее популярным методом исследования распространения радиоволн является метод параболического уравнения (МПУ). Впервые он был введён в работах Леонтовича и Фока по решению задач распространения радиоволн над сферической поверхностью Земли [4]. В основу метода положена идея о том, что амплитуда поля в направлении распространения волн изменяется намного медленнее по сравнению с поперечным направлением. В последние годы этому методу уделяется особое внимание, поскольку он снижает сложность вычислений и может работать практически со всеми видами сложных сред. Имеется ряд аналитических и численных методов решения параболического уравнения, обзор работ по этим методам проведён в статье [5]. Из численных методов решения ПУ можно выделить: методы конечных элементов (МКЭ), методы конечных разностей (МКР) и методы дискретного преобразования Фурье с расщеплением. Несмотря на способность напрямую реализовывать граничные условия (ГУ) на границах со свободным пространством, первые два метода обладают низкой точностью вычислений. Метод преобразования

* Автор, ответственный за переписку: Антон Алексеевич Новиков, anovikov00@gmail.com

Фурье с расщеплением оказывается численно более точным, однако имеются трудности, связанные с введением граничных условий.

Широкое распространение получил способ расчёта напряжённости поля методом параболического уравнения с преобразованием Фурье в городской среде в сечениях. Однако модель городской местности либо задаётся произвольно (без учёта реальных географических данных), либо данные о городской застройке извлекаются из закрытых сервисов. В настоящее время не разработана программа для моделирования распространения радиоволн в городской среде на любой высоте над поверхностью Земли и в любых сечениях на основе общедоступных цифровых карт местности. Цель работы заключалась в разработке этой программы.

Метод пошагового решения параболического уравнения

Алгоритм решения ПУ заключается в следующем (Рисунок 1): начальное поле $U(x, z)$ распространяется от антенны (т.А) вдоль продольной координаты x , в точке $x_0 + \Delta x$ применяется прямое преобразование Фурье по продольной координате, далее поле умножается на передаточную функцию слоя пространства. Затем применяется обратное преобразование Фурье по продольной координате, результат вычисления умножается на фазовый множитель, который учитывает рефракцию радиоволн в атмосфере Земли [6, 7]:

$$U(x_0 + \Delta x, z) = e^{-jk_0(n-1)\Delta x} \mathcal{F}^{-1} \left\{ e^{-j \frac{jk_z^2 \Delta x}{k_0 + \sqrt{k_0^2 - k_z^2}}} \mathcal{F}[U(x, z)] \right\}, \quad (1)$$

где \mathcal{F} - прямое преобразование Фурье, \mathcal{F}^{-1} - обратное преобразование Фурье, $U(x, z)$ - начальное распределение поля, k_0 - волновой вектор в свободном пространстве (в работе частота сигнала равна 2,4 ГГц), n - показатель преломления (в работе показатель преломления равен единице), Δx - шаг по оси x .

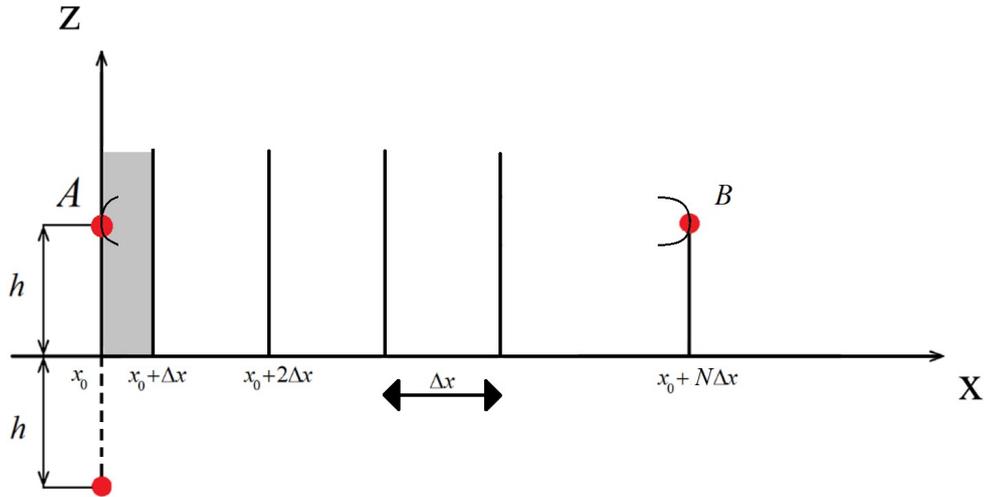


Рисунок 1 – Пошаговое решение параболического уравнения

Процесс вычисления поля повторяется в точках $x_0 + 2\Delta x$, $x_0 + 3\Delta x$, т.е. поле вычисляется шаг за шагом и распространяется до точки приёма (т. B).

Уравнение (1) записано в широкоугольном приближении (для антенн с широкой диаграммой направленности - $|\vartheta_{\max}| > 15^\circ$).

Дискретное преобразование Фурье

Необходимо отметить, что в случае горизонтальной поляризации излучения (когда отличным от нуля является вектор $E_y(x, z)$) выполняется граничное условие Дирихле:

$$U(0, x) = 0, x \geq 0. \quad (2)$$

Граничное условие соответствует случаю, когда от поля реального источника отнимается поле фиктивного излучателя. Таким образом, на высоте $h = 0$ поле равно нулю, а относительно границы

раздела Земля-воздух функция дополняется на полюсь нечётным образом, как показано на рисунке 2а. Тогда смешанное преобразование Фурье сводится к одностороннему синусному преобразованию.

В случае вертикальной поляризации излучения (когда отличным от нуля является вектор $H_y(x, z)$) выполняется граничное условие Неймана:

$$dU(0, x) = 0, x \geq 0. \tag{3}$$

Граничное условие соответствует случаю, когда проводится операция суммирования двух полей, тогда на высоте $h = 0$ поле принимает ненулевое значение, а относительно границы раздела Земля-воздух функция дополняется на полюсь чётным образом, как показано на рисунке 2б. Тогда смешанное преобразование Фурье сводится к одностороннему косинусному преобразованию.

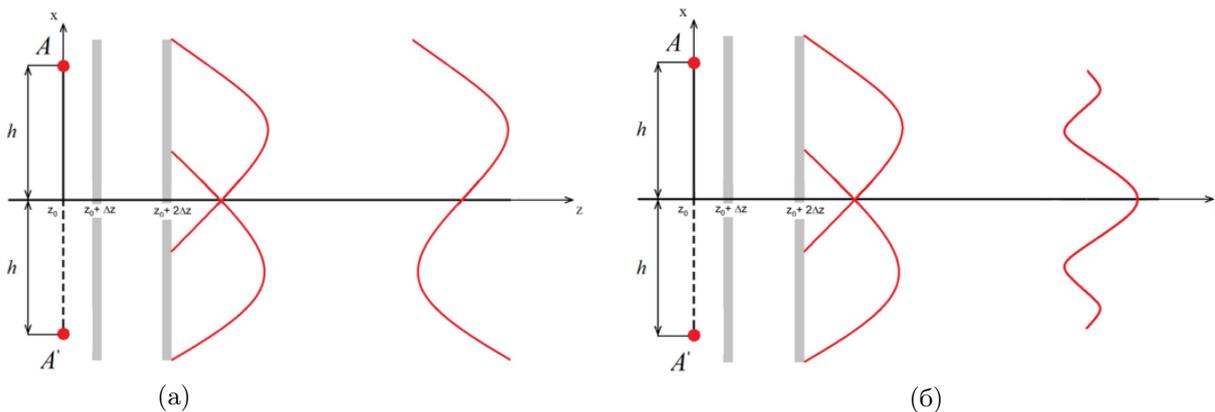


Рисунок 2 – Дискретное преобразование: а) синусное, б) косинусное

Результаты моделирования дискретных преобразований показаны на рисунке 3. Можно заметить, что на рисунке 3а в нижней области графика выполняется граничное условие Дирихле, а на рисунке 3б в нижней области графика выполняется граничное условие Неймана.

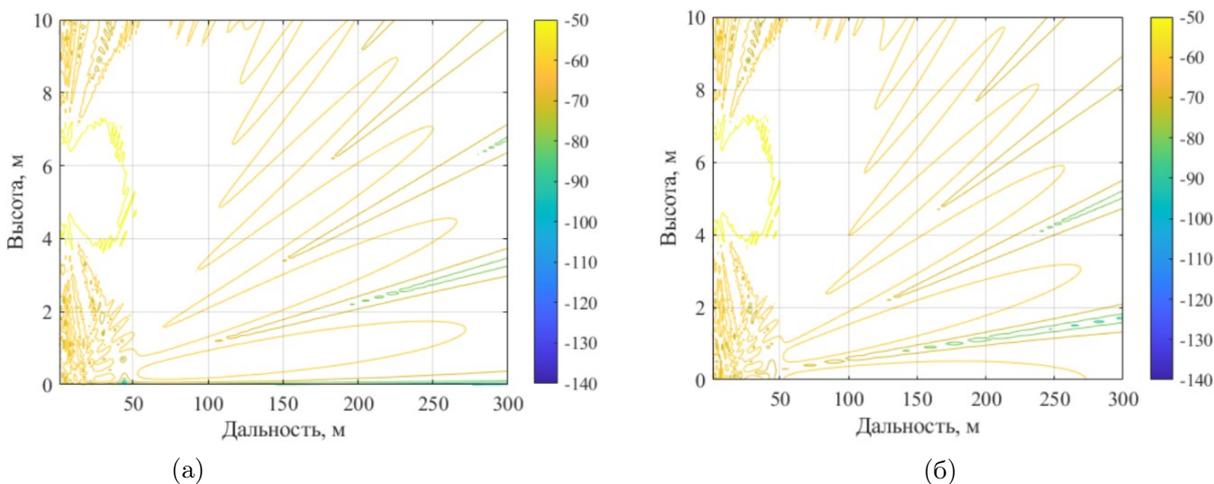


Рисунок 3 – Результаты моделирования дискретных преобразований: а) синусного, б) косинусного

Так как электромагнитное поле (ЭМП) падает на поверхность Земли под скользящим углом, то коэффициент отражения для Е- и Н-поляризации равен минус 1. В этом случае считается, что выполняется условие Дирихле [6]. В работе моделирование распространения радиоволн выполняется при помощи дискретного синусного преобразования.

Верификация методов пошагового решения параболического уравнения и геометрической оптики

Для проверки точности вычисления распределения ЭМП проведена верификация МПУ с методом геометрической оптики (ГО). Ставилась задача рассчитать напряжённость электрического поля над поверхностью Земли, которая полагалась плоской, однородной и без препятствий. Пространство над ЗП

— вакуум, направление излучения антенны задавалось вдоль поверхности Земли. Расчёт напряжённости поля проводился на интервале расстояний 0–300 м.

Результаты расчёта поля в приближении ГО и МПУ над плоской Землёй показаны ниже (Рисунок 4). Можно заметить, что распределение поля и расположение максимумов практически одинаково. Таким образом, видно графическое соответствие результатов во всей области расчёта. Различие в верхней части графика можно объяснить влиянием верхнего граничного условия, которое накладывается на ПУ, различие в нижней части графика можно объяснить влиянием ЗП на распределение поля.

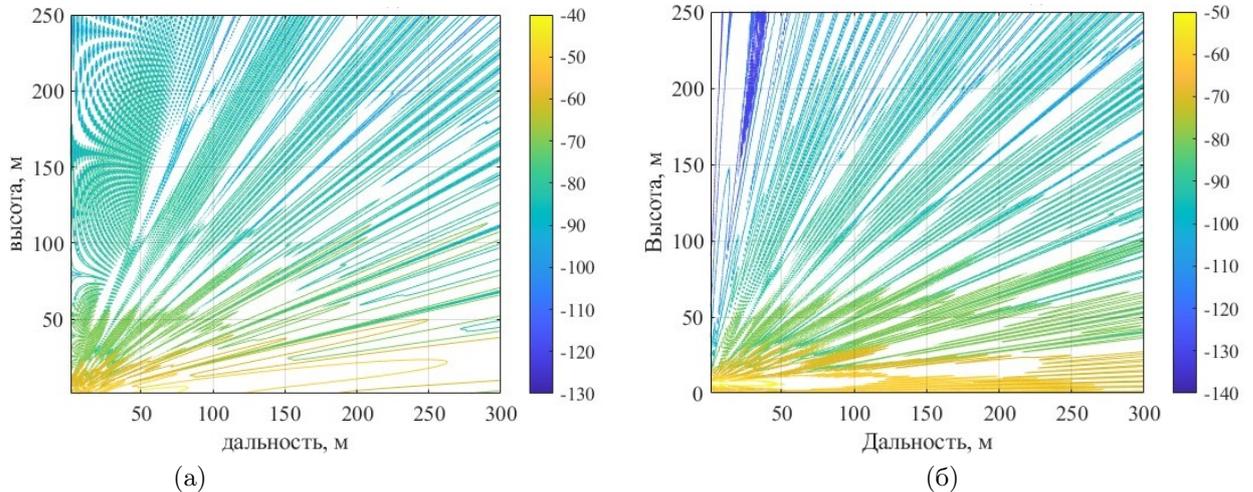


Рисунок 4 – Распределение поля методами а) геометрической оптики, б) параболического уравнения

Модель городской местности

Для моделирования участка городской застройки из общедоступного сервиса [8] были извлечены данные (широта, долгота и количество надземных этажей каждого здания). В качестве эксперимента была выбрана область в пределах месторасположения метрополитена «Селигерская». Таким образом, было выполнено моделирование городского участка (Рисунок 5). Для удобного отображения информации и дальнейшего расчёта распределения поля был осуществлён перевод географических координат (широты и долготы) в километры.

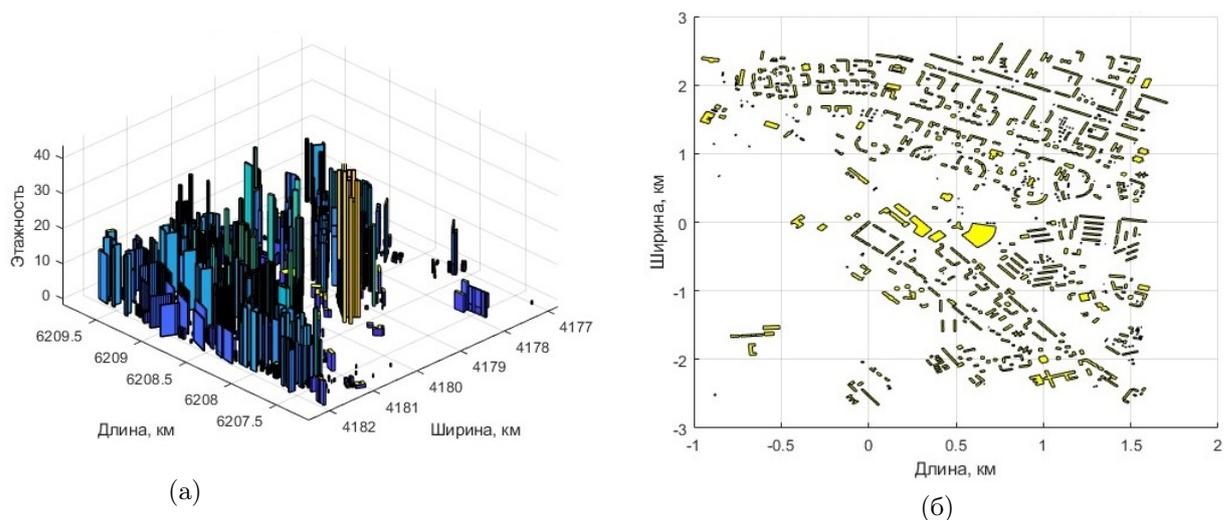


Рисунок 5 – Модель городской местности: а) трехмерный вид, б) вид сверху

Здания аппроксимировались параллелепипедами, расположенными перпендикулярно поверхности Земли.

Результаты расчёта

Стоит отметить, что вычислять напряжённость поля методом МПУ для крупномасштабных моделей затруднительно. Поэтому для упрощения расчётов урбанизированную среду можно разбить

на сечения (Рисунок 6а), по ним построить графики распределения поля и фиксировать значения напряжённости поля на высоте h (Рисунок 6б) [9]. По сохранённым значениям напряжённости поля можно будет построить график распределения поля на высоте h над поверхностью Земли:

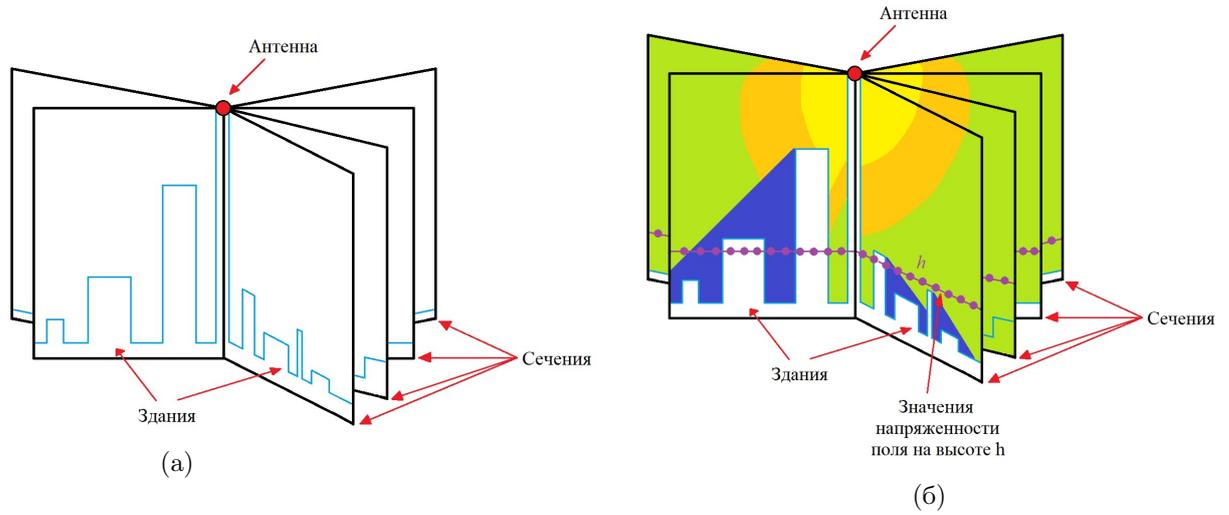


Рисунок 6 – Вычисление напряжённости поля в городской среде методом ПУ

Для построения сечений необходимо в точке (x_0, y_0) расположить антенну на крыше здания с наибольшим количеством надземных этажей. Радиус-вектор, проведенный из начала координат до его конца, является осью абсцисс для будущих графиков сечений (Рисунок 7а).

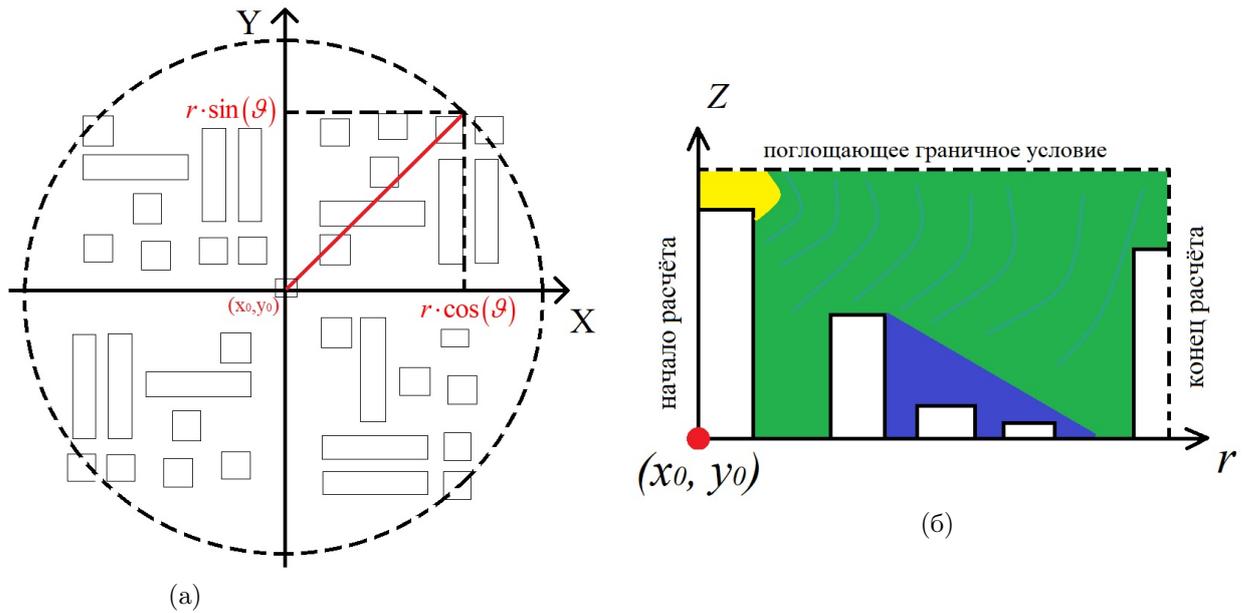


Рисунок 7 – а) построение сечения, б) вид распределения поля в сечении

Его длина определяется как квадратный корень из суммы двух составляющих:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}, \tag{4}$$

где r_x и r_y учитывают поворот радиус-вектора вокруг места расположения антенны и определяются формулами:

$$r_x = x_0 + r \cdot \cos(\vartheta), \tag{5}$$

$$r_y = y_0 + r \cdot \sin(\vartheta), \tag{6}$$

где x_0 – это координата антенны по оси x , y_0 – это координата антенны по оси y , ϑ – угол, на который поворачивается радиус-вектор вокруг начала координат (диапазон углов и шаг изменения угла выбирался произвольно), r – радиус-вектор (в работе его длина равна 3000 метров).

По построенным графикам сечений можно рассчитать распределение поля. Для его правильного вычисления необходимо корректно ввести граничные условия на границе раздела Земля-воздух (нижняя граница) и в свободном пространстве на максимальной высоте над поверхностью Земли (верхняя граница) (Рисунок 76).

Считается, что нижней границей области является реальная физическая поверхность: Земля, вода, воздух. Такая поверхность обычно представляется поверхностным импедансным граничным условием.

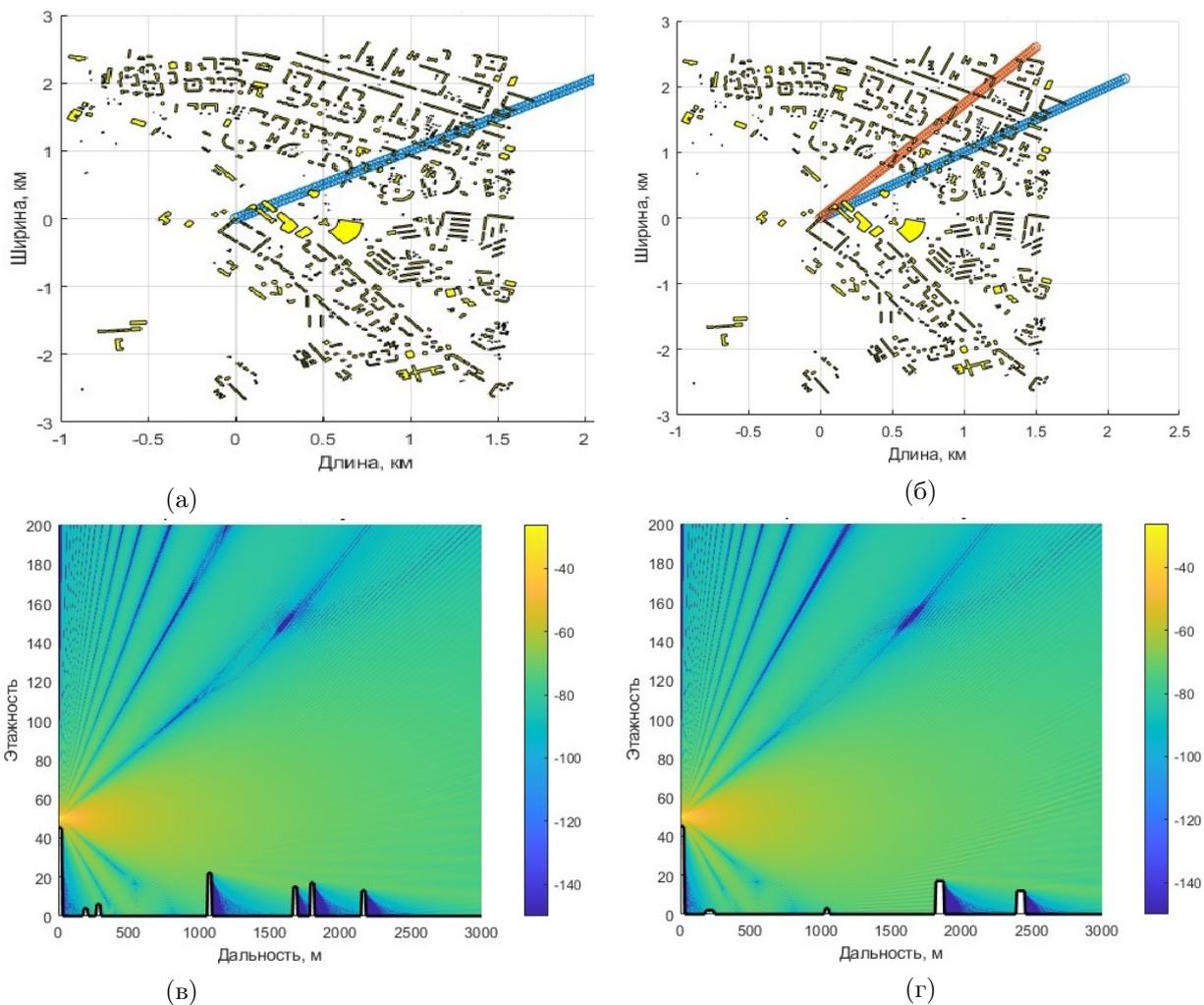


Рисунок 8 – а) сечение при 45 градусах, б) распределение поля в сечении при 45 градусах, в) сечение при 60 градусах, г) распределение поля в сечении при 60 градусах

Для верхней границы устанавливается предел области расчёта по высоте, так как имеется ограничение на объём оперативной памяти. Однако усечение расчётной области приводит к отражению радиоволн от искусственной границы, которая расположена на максимальной высоте. Поэтому необходимо введение искусственного поглощающего или идеально согласованного слоя [10]. Идеально согласованный слой представляется в виде среды с потерями, которые вводятся искусственно. В работе идеально согласованный слой вводится путём умножения уравнения (2) на весовую функцию:

$$w(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq 0,8 \times Z_{max} \\ e^{-b(|z|-1)^2}, & 0,8 \times Z_{max} < |z| \leq Z_{max} \end{cases}, \tag{7}$$

где $b = 0,5$ – задаётся произвольно; Z_{max} - максимальное значение области расчёта по высоте.

В результате было найдено распределение поля в плоскости (r, Z) в нескольких сечениях (Рисунок 8). Распределение поля в сечении на рисунке 8в соответствует синей линии, проведенной на

рисунке 8а. Аналогичным образом, поле на рисунке 8г совпадает с красной линией на рисунке 8б. Максимальная мощность поля соответствует жёлтому цвету. Более холодные цвета соответствуют меньшим значениям уровня напряжённости поля. Для отображения зоны тени используется фиолетовый цвет.

По значениям напряжённости поля в каждом сечении можно построить распределение поля на высоте h (Рисунок 9). Ниже представлены графики распределения поля на высоте 2 этажа и 20 этажа. Так как внутри зданий поле отсутствует, то его значение мощности соответствует белому цвету. Поэтому на рисунке 9 здания отмечены в виде белых геометрических фигур. Аналогично рисунку 8, наибольшая мощность поля соответствует жёлтому цвету, фиолетовому цвету соответствует зона тени. Таким образом, для расположения базовых станций мобильной связи необходимо выбирать место с наименьшей областью тени.

По мере увеличения высоты здания с меньшей этажностью не учитываются, следовательно, область тени уменьшается.

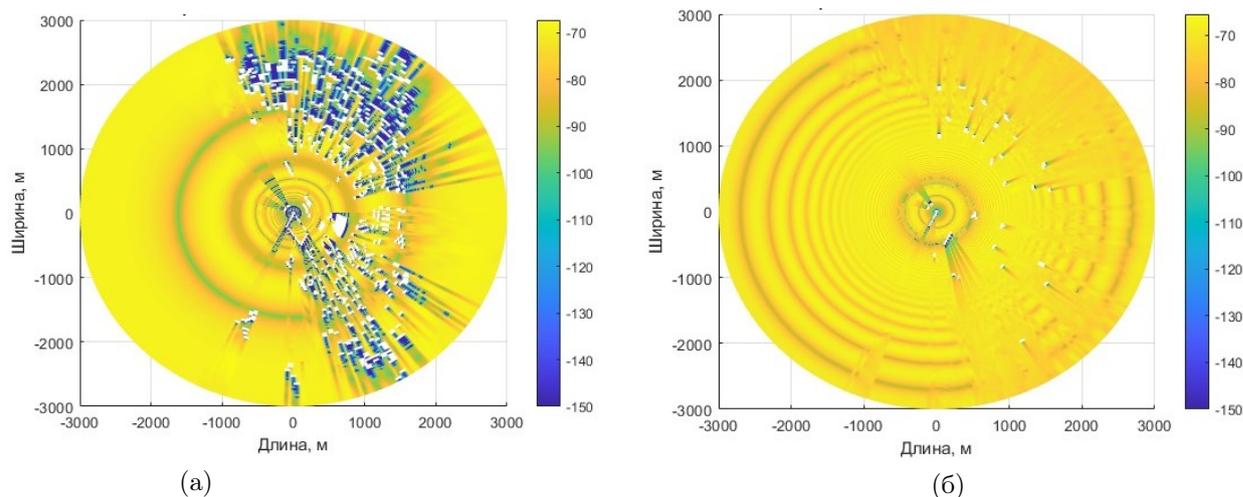


Рисунок 9 – а) распределение поля на высоте 2 этажа, б) распределение поля на высоте 20 этажа

5. Заключение

Итогом проделанной работы является разработанная программа для исследования распространения радиоволн в условиях городской местности. Для поставленных задач применялся метод пошагового решения параболического уравнения. По графикам напряжённости поля можно заметить, что при распространении поля имеется эффект дифракции. Однако стоит отметить, что в данном методе не учитывается горизонтальная дифракция.

Список литературы

- [1] V. A. Permyakov, M. S. Mikhailov and E. S. Malevich, "Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 4, pp. 2167-2175, April 2019, doi:10.1109/TAP.2019.2905674.
- [2] Yoshihisa OKUMURA, Eiji OHMURI, Tomihiko KAWANO. Kaneharu FUKUDA "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service" // *Review of the Electrical Communication Laboratory*. Vol.16, Num.9-10, 1968, pp. 825-873.
- [3] Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 1980, V. VT – 29, N.3, pp. 317-325.
- [4] Леонтович М.А., Фок В.А. Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности Земли по методу параболического уравнения // *ЖЭТФ*, 16, 1946, № 7, стр. 557.
- [5] Акулиничев Ю. П., Захаров Ф. Н., Пермяков В. А., Михайлов М. С. Состояние и перспективы развития методов численного решения параболического уравнения // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. Т. 59. №. 12-3. С. 169-177.
- [6] Ахияров В.В. Решение задачи дифракции радиоволн над земной поверхностью методом параболического уравнения // *Докл. IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН*. 2010. С.762.

- [7] M. Levy, Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation, London, IEE Institution of Electrical Engineers, 2000
- [8] Overpass Turbo. <https://overpass-turbo.eu/> (дата обращения: 18.05.2024)
- [9] Y. Shen and C. Cao, "Parallel method of parabolic equation for electromagnetic environment simulation," 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2016, pp. 515-519, doi:10.1109/ITNEC.2016.7560414.
- [10] Акулиничев Ю.П., Абрамов П.В., Ваулин И.Н. Влияние поглощающего слоя на численное решение параболического уравнения // Докл. ТУСУРа. 2007. №2 (16). С.139-145.
-

STUDY OF RADIO WAVE PROPAGATION PROCESSES IN URBAN CONDITIONS

A.A. Novikov^{*1,2}, K.S. Sychev², M.S. Mikhailov²

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

* anovikov00@gmail.com

Abstract

The article presents the results of modeling the propagation of radio waves in urban areas using the method of step-by-step solving a parabolic equation. A program has been developed that allows, based on data on the geometry of buildings extracted from digital maps of the area, to model a selected area of the urban environment and calculate the field distribution in it at any height above the Earth's surface (ES) and in any sections. An area within the location of the Seligerskaya metro was chosen as an experiment. The graphs show the field radiation from an antenna located on the roof of the building with the largest number of above-ground floors, and also display the shadow area.

Key words: radio wave propagation, urban area, parabolic equation, factorization method, field distribution, digital terrain maps

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

А.С. Ильин * ¹, А.В. Гусев¹, К.А. Маилян¹, А.В. Глушечков¹, А.В. Киселев¹,
А.В. Качанов¹

¹ 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 (ε_T) материалов, нагретых до температур от 100 до 250 °С. Основное внимание уделено изменению этого коэффициента в зависимости от угла падения излучения (φ). 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 (ε_T) является важным аспектом для оптимизации процессов излучательного теплопереноса в инженерных приложениях. Понимание пространственного распределения ε_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 ε_T в зависимости от угла падения излучения (φ) для материалов, нагретых до 100-250 °С, с использованием специально разработанного измерительного стенда, обеспечивающего высокую точность. Новизна исследования заключается в детальном анализе углового распределения ε_T ИК излучения для различных материалов, что обеспечивает более точные данные для инженерных расчетов и моделирования сложных систем.

Введение

Интегральный коэффициент излучения ε_T является коэффициентом пропорциональности в выражении закона Стефана – Больцмана:

* Автор, ответственный за переписку: Александр Семёнович Ильин, iliin876@gmail.com

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

где M – энергетическая светимость реального тела,

σ – постоянная Стефана -Больцмана,

T – температура тела, К,

ε_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_φ – сигнал с приёмника излучения при угле падения потока излучения, равном φ к поверхности.

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

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

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

Существует несколько способов определения ε_{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.

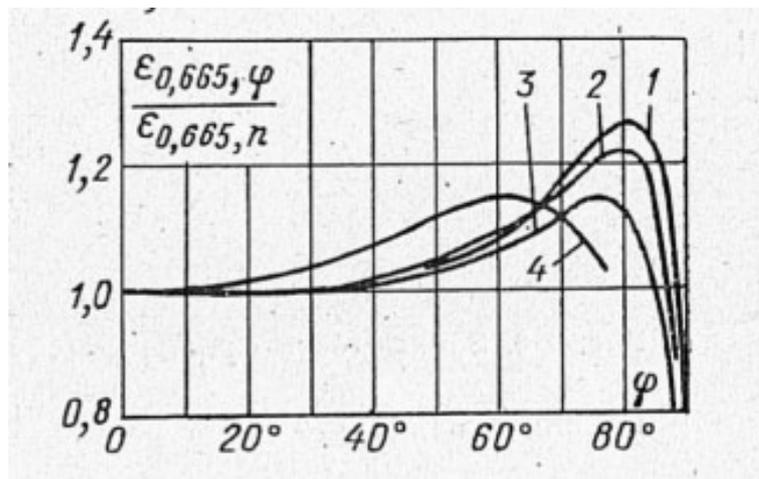


Рисунок 1 – Относительное изменение спектрального коэффициента излучения для $\varepsilon(\lambda)_{T\varphi}$ для $\lambda = 0,665$ мкм для некоторых металлов: 1 – платина, 2 – манганин, 3 – вольфрам, 4 – железо [3, 5]

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;

λ = 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° идёт увеличение отражения до $\varepsilon_{T\varphi}/\varepsilon_{Tn} \approx 1,2$ до 80° и спад до 0 к 90° [3,4].

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

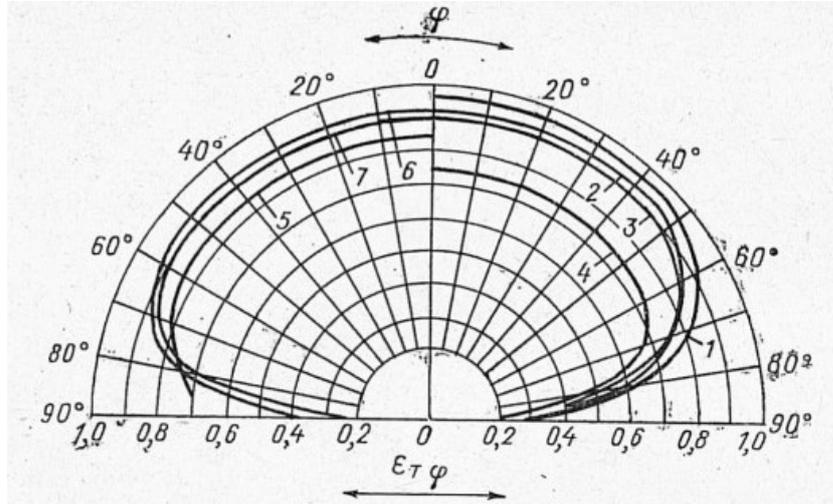


Рисунок 2 – Зависимость $\varepsilon_{T\varphi} = f(\varphi)$ для некоторых диэлектриков с матовой поверхностью: 1 – лёд (мокрый), 2 – стекло, 3 – глина, 4 – окись меди, 5 – корунд, 6 – древесина, 7 – бумага

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 φ стремится к 90° .

Из данного обзора следует, что зависимость $\varepsilon_{T\varphi} = f(\varphi)$ может быть определена только экспериментально. Если температура поверхности исследуемых образцов не превышает 200° , 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.

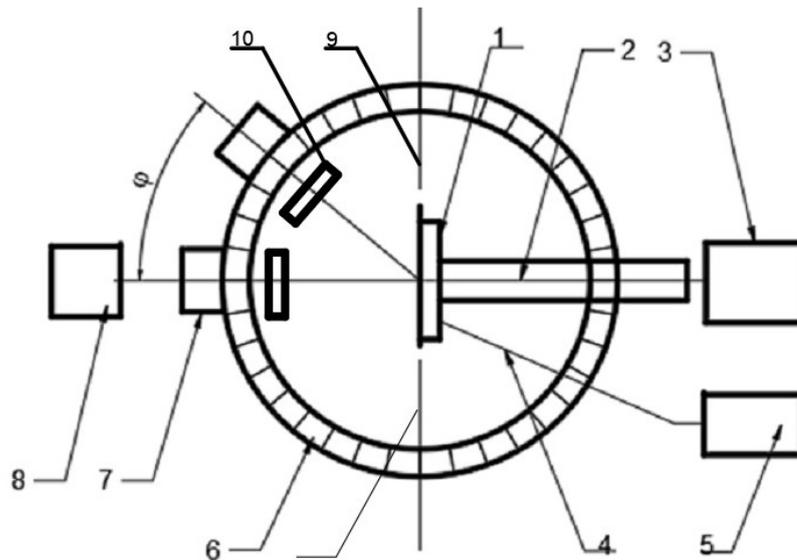


Рисунок 3 – Блок-схема стенда для измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения: 1 – исследуемый образец, 2 – нагреватель образца, 3 – блок питания нагревателя, 4 – термопара, 5, 8 – микровольтметр АРРА-109, 6 – поворотный столик с лимбом, имеющим разрешение 1° , 7 – 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 ε_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/м². 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 ²	10 - 2000
Постоянная времени	с	0,4 – 0,6
Обнаружительная способность, D*	Вт · Гц ^{-0,5} · см ^{0,5}	$(7,5 - 8) \cdot 10^8$
Время выхода сигнала на уровень 0,99 U _{max}	с	≤ 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.

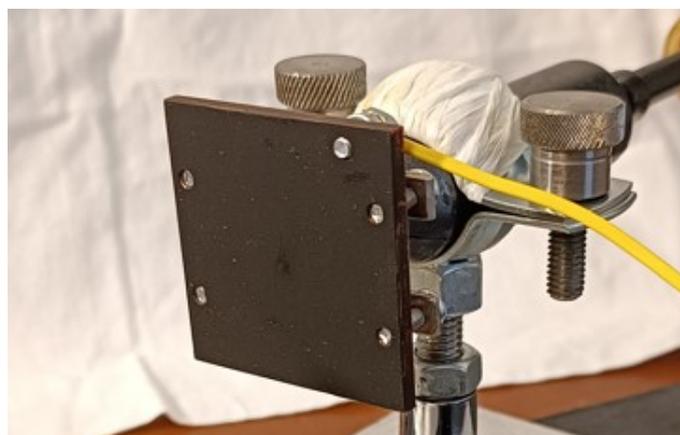


Рисунок 4 – Конструкция подложки

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

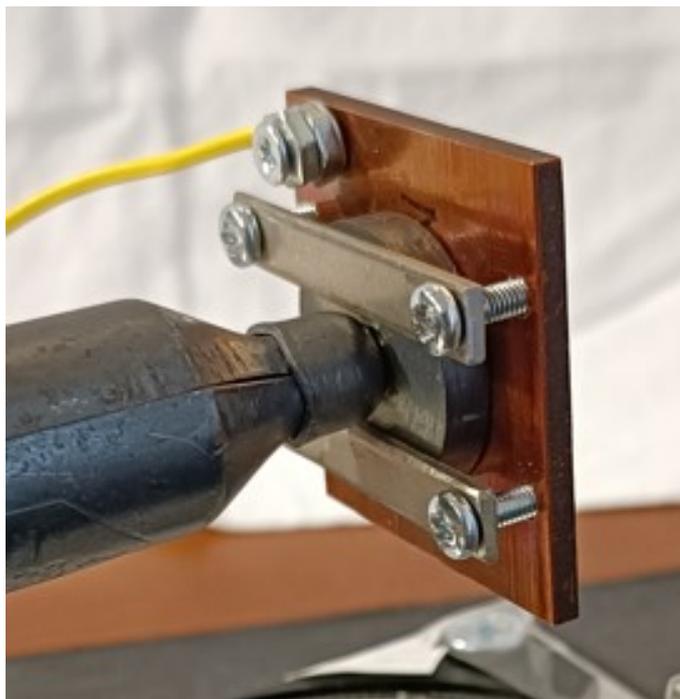


Рисунок 5 – Крепление подложки к нагревателю

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.

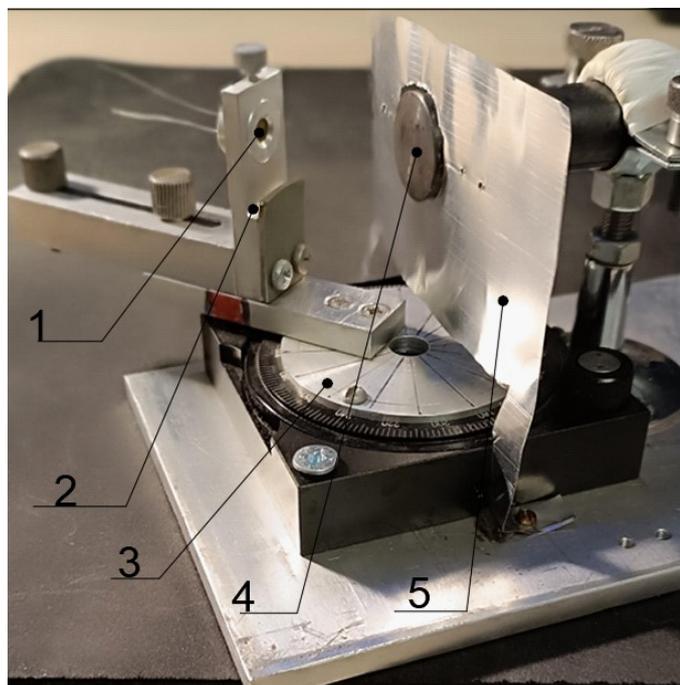


Рисунок 6 – Стенд для измерения пространственного распределения интегрального коэффициента излучения в диапазоне длин волн от 5 до 25 мкм: 1 – приёмник излучения типа ТП-1, 2 – паз для установки заслонки, 3 – оптический поворотный столик, 4 – нагреватель, 5 – радиационный экран

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 Δ , 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°C .

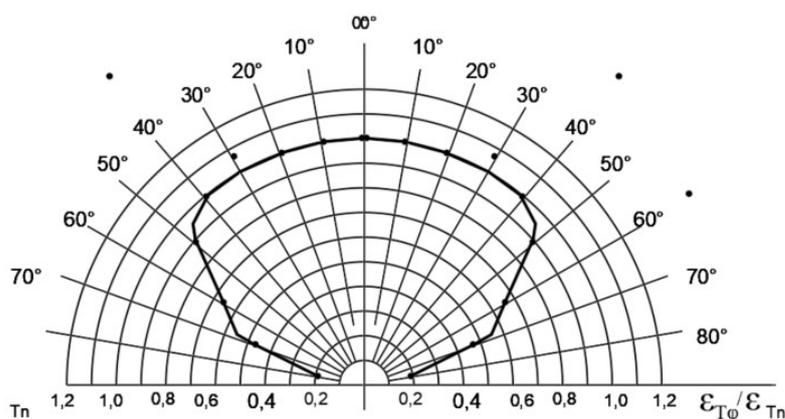


Рисунок 7 – Угловое распределение $\epsilon_{T\varphi}$ шлифованной медной поверхности при температуре 160°C

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°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
U_T	1	1	2	3	5	6	7	8	11
U_c	31	29	29	36	32	30	27	22	14
Δ_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
Δ_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
Δ_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
Δ_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
Δ_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°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°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°C .

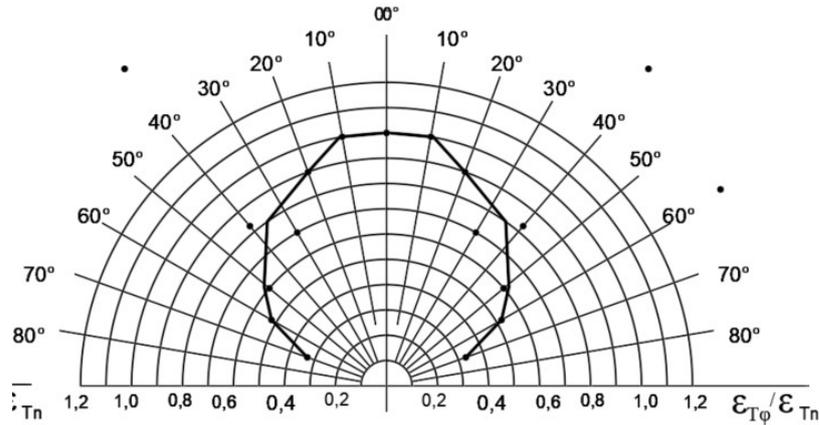


Рисунок 8 – Угловое распределение $\varepsilon_{T\varphi}$ полированной медной поверхности при температуре 160°C . Расстояние от поверхности до приёмника равно 35 мм

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°C .

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

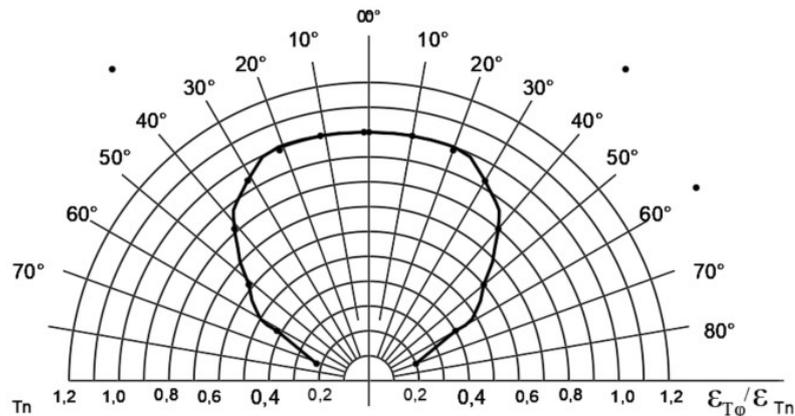


Рисунок 9 – Угловое распределение $\varepsilon_{T\varphi}$ краски ABRO, нанесённой на шлифованную медную подложку при температуре 143°C . Расстояние от поверхности до приёмника равно 53 мм

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° до 70° .

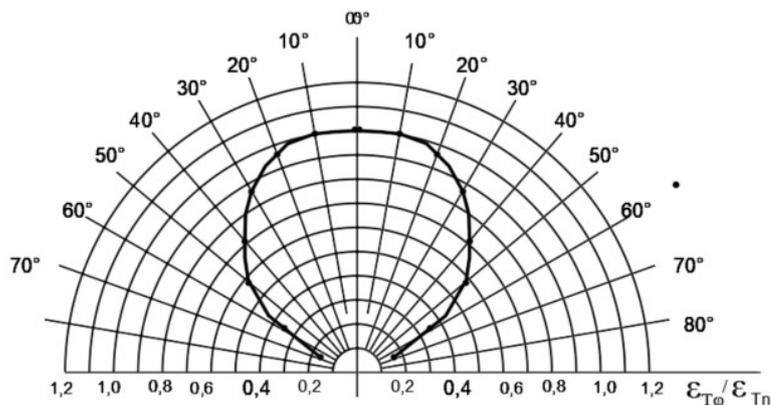


Рисунок 10 – Угловое распределение $\varepsilon_{T\varphi}$ краски MOTIP, нанесённой на шлифованную медную подложку при температуре 145°C. Расстояние от поверхности до приёмника равно 53 мм

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° до 70° .

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

φ	$\pm 0^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 70^\circ$
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 , Δ_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 ε 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 Δ - 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 Θ_i (НСП).

S_Σ - 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_Θ - среднее квадратическое отклонение НСП, которое, в нашем случае, оценивается по формуле:

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

где Θ_Σ - границы НСП, которые определяют по формуле:

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

где Θ_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. (Θ_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	Θ_U	3
НСП от величины измеряемой температуры	Θ_t	2
Границы НСП	$\Theta_{\Sigma}(P)$	6,8
СКО НСП	S_{Θ}	4,0
СКО суммарное	S_{Σ}	2,0
Доверительные границы случайной погрешности	ε	5,0
Коэффициент К	К	2,0
СКО относительное с образца	$S_{\varepsilon\varphi}$	2,0
Основная погрешность приёмника ТП-1	$\Theta_{ТП-1}$	4,0

5. Заключение

Результаты проведенного исследования позволили получить детальные данные о пространственном распределении интегрального коэффициента излучения (ε_T) для различных материалов при углах падения излучения от 0° до 80° . Полученные данные подтверждают, что угловое распределение ε_T существенно зависит от материала поверхности и ее обработки. Полированная медная поверхность показала наибольшую равномерность распределения ε_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 ε_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 ε_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., Сая 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^{*1}, A.V. Gusev¹, K.A. Mailyan¹, A.V. Glushchenkov¹, A.V. Kiselev¹,
A.V. Kachanov¹**

¹ 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 (εT) 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 (φ). 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
