

УДК 697 + 536.3

**Василий Степанович Глазов**

ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», доктор технических наук, доцент кафедры теплообменных процессов и установок, Россия, Москва, телефон (495) 362-71-49, e-mail: GlazovVS@mpei.ru

**Андрей Дмитриевич Лобов**

ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», аспирант кафедры теплообменных процессов и установок, Россия, Москва, e-mail: andreylobov6@gmail.com

**Чолпонбек Аманович Кадыров**

«Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, Кыргызская Республика, Бишкек, e-mail: chk\_66@mail.ru

**Константин Иванович Лешков**

ПАО «Сбербанк России», главный эксперт, Россия, Москва, e-mail: c.leshkov@gmail.com

## **Исследование направленной излучательной способности лакокрасочных материалов, используемых при покрытии конвективных поверхностей теплообменных аппаратов<sup>1</sup>**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** При выполнении тепловых расчетов теплообменных аппаратов, предназначенных для обеспечения комфортных условий в помещениях, необходимо учитывать как конвективную, так и лучистую составляющие суммарного теплового потока. Это позволяет обоснованно подбирать геометрические характеристики аппаратов в целях максимизации исходящего суммарного теплового потока. Для проведения расчета по определению исходящего лучистого теплового потока от теплообменного аппарата требуется знать величину направленной излучательной способности материала, используемого для покрытия его конвективной поверхности. В научной литературе отсутствуют работы, посвященные экспериментальному или теоретическому определению направленной излучательной способности лакокрасочных покрытий, применяемых на конвективных поверхностях теплообменных аппаратов. Поскольку форма, размер и шаг расположения ребер на теплообменной поверхности аппарата в сочетании с направленной ее излучательной способностью способны влиять на величину исходящего от нее лучисто-конвективного потока, важно знать, при каких параметрах теплообменной поверхности величина теплового потока принимает экстремальное значение и какова доля каждой составляющей теплообмена в этом потоке. Таким образом, исследования, направленные на разработку экспериментальной установки и метода определения направленной излучательной способности лакокрасочных покрытий, актуальны как с точки зрения получения новых знаний, так и с позиции совершенствования метода расчета, реализация которого ведет к созданию теплообменного оборудования с высокой энергетической эффективностью.

**Материалы и методы.** Исследование направленной излучательной способности лакокрасочных материалов осуществлено посредством проведения эксперимента на специально разработанной экспериментальной установке.

**Результаты.** Разработаны экспериментальная установка и метод определения (оценки) величины направленной излучательной способности лакокрасочных материалов, используемых при покрытии конвективных поверхностей теплообменных аппаратов.

**Выводы.** По результатам экспериментальных исследований направленной излучательной способности лакокрасочных материалов установлено, что влияние цвета на ее величину является незначительным. В частности, лакокрасочные покрытия различных цветов, но идентичного химического состава демонстрируют близкие значения направленной излучательной способности.

**Ключевые слова:** направленная излучательная способность, лучисто-конвективный тепловой поток, лакокрасочные покрытия

**Vasilii Stepanovich Glazov**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Equipment Department, Moscow, Russia, e-mail: GlazovVS@mpei.ru

<sup>1</sup> Работа выполнена в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 25-19-00781).

The work has been carried out at the National Research University "MPEI" with the financial support of the Russian Science Foundation (project 25-19-00781).

**Andrei Dmitrievich Lobov**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Postgraduate Student, Department of Heat and Mass Transfer Processes and Equipment, Moscow, Russia, e-mail: andreylov6@gmail.com

**Chelponbek Amanovich Kadyrov**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Kyrgyz Republic, Bishkek, e-mail: chk\_66@mail.ru

**Konstantin Ivanovich Leshkov**

PJSC Sberbank of Russia, Lead Expert, Moscow, Russia, e-mail: c.leshkov@gmail.com

## Study of directional emissivity of paint coatings used on convective surfaces of heat exchangers

### Abstract

**Background.** Thermal calculations of heat exchangers designed to ensure comfortable indoor conditions must account for both convective and radiative components of the total heat flux. This approach enables the rational selection of geometric parameters of apparatuses to maximize the total heat output. Accurate calculation of the radiative heat flux emitted by a heat exchanger requires knowledge of the directional emissivity of the material coating its convective surfaces. Unfortunately, the scientific literature contains no works devoted to either experimental or theoretical determination of the directional emissivity of paint coatings applied to convective surfaces of heat exchanger apparatuses. Since the shape, size, and spacing of the fins on the heat exchange surface of the apparatus, in combination with its directional emissivity, can affect the magnitude of the radiant convective heat flux emanating from it, it is important to know, at what parameters of the heat exchange surface the heat flux reaches an extreme value; what proportion each heat transfer component contributes to this flux. Thus, research devoted to the development of an experimental setup and a method to determine the directional emissivity of paint coatings is relevant both from the perspective of acquiring new knowledge and from the standpoint of improving the calculation method, the implementation of which leads to the development of heat exchange equipment with high energy efficiency.

**Materials and methods.** The study of the directional emissivity of paint coating has been carried out experimentally on a specially designed experimental setup.

**Results.** An experimental setup has been developed, along with a method to evaluate the magnitude of directional emissivity of paint coatings used on convective surfaces of heat exchanger apparatuses.

**Conclusions.** Experimental results of directional emissivity of paint coatings show that the influence of coating color on directional emissivity is negligible. Specifically, paint coatings of different colors but identical chemical composition exhibit closely similar directional emissivity values.

**Key words:** directional emissivity, radiant-convective heat flux, paint coatings

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.2.037-042

**Введение.** В настоящее время при строительстве зданий для поддержания комфортных условий внутри помещения в холодный период года используются различные отопительные приборы, например радиаторы и конвекторы. Процесс теплообмена между отопительным прибором и воздухом внутри помещения протекает не только за счет конвекции, но и за счет теплового излучения (лучистого теплообмена). Согласно [1], при подборе геометрических характеристик теплообменного аппарата, обеспечивающих максимизацию суммарного лучисто-конвективного теплового потока, исходящего от его поверхности, необходимо учитывать направленную излучательную способность покрытия аппарата.

В работе Э.М. Сперроу и Р.Д. Сесс [2] представлены результаты определения величины направленной излучательной способности различных материалов [2, с. 50, рис. 2–6, с. 51, рис. 2–7]. Главным недостатком исследования [2] является отсутствие данных о величине

направленной излучательной способности лакокрасочных материалов, которые могут использоваться при покрытии конвективных поверхностей теплообменных аппаратов.

В работе Р. Зигеля и Д. Хауэлла [3] приведены данные о направленной излучательной способности диэлектриков с различными показателями преломления [3, с. 126, фиг. 4.5]. В [3] указано, что величина направленной излучательной способности диэлектриков уменьшается с увеличением угла излучения от нормали. Однако представленная информация носит обобщенный характер и не позволяет однозначно идентифицировать исследованные материалы и температурные условия экспериментов, поскольку эти сведения в источнике отсутствуют.

В работе А.Г. Блоха [4] представлены результаты исследования, посвященного определению величины направленной излучательной способности в зависимости от толщины покрытия [4, с. 63, рис. 4.5]. Существенным недостатком

ком рассматриваемого исследования является отсутствие информации о материале покрытия и температурных условиях, при которых получены результаты. Вследствие этого, использование представленных данных для расчета лучистого теплового потока от поверхностей теплообменных аппаратов представляется затруднительным.

Данные о величине направленной излучательной способности материалов, указанные в [1–4], взяты из [5], где описывается экспериментальная установка, а также представлены результаты измерений направленной излучательной способности различных материалов. Предложенный в [5] метод определения направленной излучательной способности основан на сравнительном подходе; для его реализации необходимо наличие эталонного материала с известной функцией изменения величины направленной излучательной способности, а также использование сложной экспериментальной установки.

В [6] представлены результаты эксперимента по определению нормальной степени черноты металлической трубки при температурах от 100 до 500 °С с применением тепловизионного сравнительного метода. Плюсами данного исследования являются широкий температурный диапазон измерений, разработка методики эксперимента по определению степени черноты, оценка влияния окисления металлической поверхности на величину степени черноты. Недостатки заключаются в том, что в исследовании не указан материал объекта, а также определена лишь нормальная степень черноты без оценки направленной излучательной способности. Кроме того, диапазон температур, использованный в эксперименте, выходит за пределы типичных температур нагрева радиаторов и конвекторов отопления.

Анализ научной литературы показал, что в настоящее время недостаточно экспериментальных данных о величине направленной излучательной способности лакокрасочных материалов, применяемых для покрытия поверхностей радиаторов и конвекторов отопления. В связи с этим проведение таких исследований представляется актуальным, поскольку полученные результаты могут быть использованы для определения геометрических характеристик данных теплообменных аппаратов, обеспечивающих максимизацию суммарного лучисто-конвективного теплового потока, исходящего от них.

**Методы исследования.** Для проведения эксперимента по определению величины направленной излучательной способности лакокрасочных материалов была разработана экспериментальная установка (рис. 1, 2).

Объектом исследования является алюминевая пластина, покрытая термостойкой эмалью, которая может применяться в покрытии конвективной поверхности теплообменного

аппарата. На тыльной стороне пластины крепится силиконовый нагревательный элемент ЭНПлС 100х100. Для регулирования температуры нагрева нагревательный элемент подключается к сети 220 В через реостат, при помощи которого регулируется мощность нагрева.

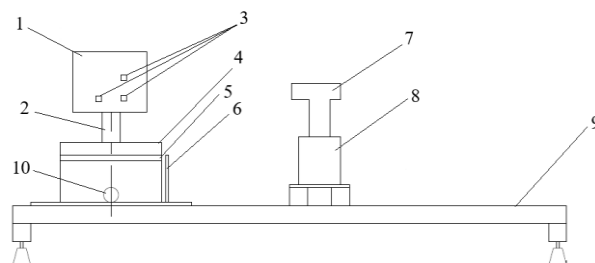


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – пластина с нагревательным элементом; 2 – теплоизолирующий крепеж пластины; 3 – датчики температуры; 4 – поворотное основание; 5 – шкала угла; 6 – указатель угла; 7 – пирометр; 8 – основание пирометра; 9 – станина; 10 – отверстие для вывода проводов



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

Для измерения температуры поверхности пластины использовано три цифровых датчика температуры DS18B20, установленных непосредственно на ее поверхность и подключенных к микроконтроллерной плате ESP32. Сигналы с датчиков обрабатываются с помощью специально разработанного программного кода, реализованного в среде Arduino IDE. Полученные данные преобразуются в значения температуры и обновляются с периодичностью 5 с. Пластина через теплоизоляционную проставку крепится к поворотному основанию, на которое нанесена градуировка угла каждые 5 градусов нормали пластины к пирометру.

Для определения лучистого теплового потока, исходящего с поверхности пластины, используется пирометр Elitech БТ 350. Значение степени черноты, выставяемое производителем и указанное в паспорте пирометра, составляет 0,95. В качестве покрытия пластины использованы 4 термостойкие эмали на основе кремнийорганических смол [6] Elcon Max Therm разного цвета: белого (RAL 9003), зеленого (RAL 6002), синего (RAL 5005), ярко-красного (RAL 3020). Толщина покрытия – в диапазоне

100–150 мкм (в соответствии с рекомендациями производителя для покрытия поверхностей радиаторов отопления) [7].

**Ход эксперимента.** В ходе эксперимента алюминиевая пластина последовательно окрашивалась эмалями, отличающимися только цветом. Перед нанесением каждого нового слоя предыдущее покрытие полностью удалялось. Пластина нагревалась до температуры 80 °С. Выбор именно такой температуры обусловлен диапазоном рабочих температур радиаторов и конвекторов систем отопления, используемых для обеспечения комфортных условий в помещении. После нагрева пластины до требуемой температуры при помощи реостата на нагревательном элементе снижалась мощность нагрева для поддержания стационарного режима теплообмена.

Затем с помощью пирометра проводились измерения температуры поверхности пластины под разными вертикальными углами в диапазоне от 90° до 0°. Для каждого цвета покрытия проводилась серия из трех независимых экспериментов.

В каждом случае рассчитывалось среднее значение температуры, полученное с трех контактных датчиков и пирометра (см. таблицу), также была выполнена оценка как инструментальной, так и случайной составляющих погрешности.

Исходя из того что пирометр измеряет величину исходящего с поверхности лучистого теплового потока ( $Q_{\text{л}}$ ) и величина температуры пересчитывается по внутренним функциям с учетом установленной величины степени черноты ( $\varepsilon_{\text{пир}}$ ), функция температуры имеет следующий вид:

$$T_{\text{пир}}(Q_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{пир}}) \cdot \quad (1)$$

#### Экспериментальные данные

$\theta$ , град	T RAL 9003, °С	Tн RAL 9003, °С	T RAL 3020, °С	Tн RAL 3020, °С	T RAL 5005, °С	Tн RAL 5005, °С	T RAL 6002, °С	Tн RAL 6002, °С
90	76,81	76,50	77,09	76,43	77,26	76,93	77,52	76,27
85	77,03	76,47	77,09	76,27	77,33	76,80	77,36	75,97
80	76,79	76,40	77,01	76,17	77,13	76,60	77,31	75,73
75	76,83	76,37	76,97	76,07	77,19	76,43	77,23	75,63
70	76,83	76,30	77,12	76,07	77,21	76,33	77,21	75,53
60	76,88	76,00	77,08	75,90	77,59	76,2	77,304	74,77
50	76,92	75,23	77,13	75,07	77,36	75,1	77,43	73,40
40	76,96	72,57	77,14	72,53	77,28	72,1	77,44	70,13
30	76,78	67,77	77,12	67,43	77,30	66,97	77,34	64,40
20	76,76	60,30	77,00	59,77	77,34	58,5	77,39	56,37
0	76,76	0	77,00	0	77,34	0	77,35	0

Ошибка, возникающая при определении  $T_{\text{пл}}$  из-за  $\varepsilon_{\text{пир}} \neq \varepsilon_{\text{пл}}$ , устраняется путем замены  $T_{\text{пир}}$  на  $T_{\text{пл.фак}}$ , которая фиксируется датчиком температуры, и расчетом  $\varepsilon_{\text{пл}}$  из условия

$$T_{\text{пир}}(Q_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{пир}}) = T_{\text{пл.фак}}(Q_{\text{л}}, \varepsilon_{\text{пл}}). \quad (2)$$

С учетом (2) и известного уравнения Стефана-Больцмана выражение для вычисления величины направленной излучательной способности принимает вид

$$\varepsilon_{\text{пл}} = \frac{\varepsilon_{\text{пир}} T_{\text{пир}}^4}{T_{\text{пл.фак}}^4}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{пл}}$  – величина направленной излучательной способности поверхности;  $\varepsilon_{\text{пир}} = 0,95$  – степень черноты, выставленная на пирометре;  $T_{\text{пл.фак}}$  – фактическая температура поверхности образца с датчиков, К;  $T_{\text{пир}}$  – температура поверхности, определенная пирометром, К.

На основании представленной зависимости (3) и экспериментальных данных (см. таблицу) был выполнен расчет направленной излучательной способности для различных цветов эмали при фиксированной температуре нагрева пластины. Результаты расчета отображены в виде графиков как в полярной системе координат (рис. 3), так и в декартовой системе координат (рис. 4).

Для верификации экспериментальных данных было выполнено сравнение с литературными данными полной нормальной излучательной способности белого лака [8, с. 331, табл. П11]: в диапазоне температур от 40 до 95 °С указан коэффициент  $\varepsilon_{\text{нор}} = 0,80–0,95$ .

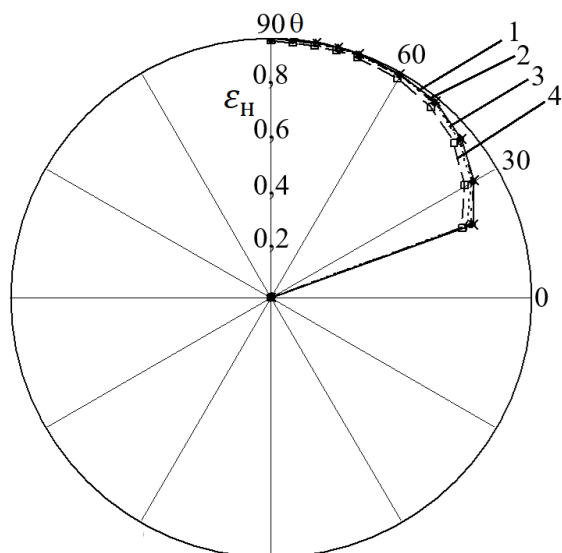


Рис. 3. Величина направленной излучательной способности в зависимости от угла в полярной системе координат: 1 – белый цвет (RAL 9003); 2 – синий (RAL 5005); 3 – зеленый (RAL 6002); 4 – красный (RAL 3020)

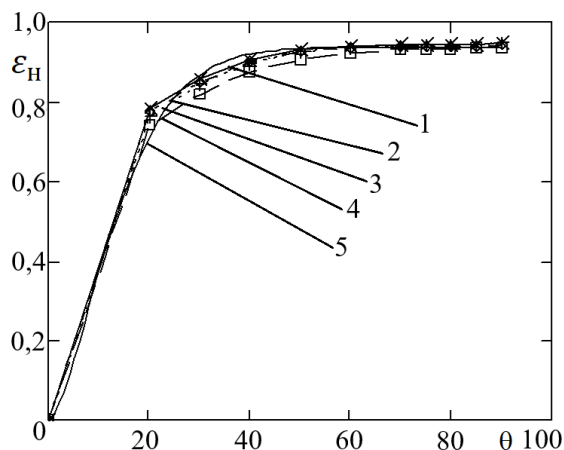


Рис. 4. Величина направленной излучательной способности в зависимости от угла в декартовой системе координат: 1 – белый цвет (RAL 9003); 2 – синий (RAL 5005); 3 – зеленый (RAL 6002); 4 – красный (RAL 3020); 5 – аппроксимация кривой 1

Полученное в ходе эксперимента значение нормальной излучательной способности белой эмали при температуре около 80 °С составило  $\varepsilon_{\text{нор}} = 0,947$ , что находится в хорошем соответствии с данными справочника.

Дополнительно для проверки результатов исследования был выполнен расчет суммарного лучисто-конвективного теплового потока, исходящего с поверхности экспериментальной пластины, и его величина сопоставлена с электрической мощностью, подводимой к пластине от нагревательного элемента. Величина подводимой мощности определялась по показаниям ваттметра, при этом предполагалось, что практически вся электрическая мощность нагревателя (около 100 %) преобразуется в теплоту.

Лучистый тепловой поток определяется согласно [9]:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{1-2} 5,67 b (T_{\text{пов}} - T_{\text{пом}}) \varphi_{1-2} F_1; \quad (4)$$

$$b = 0,81 + 0,01 (T_{\text{пов}} + T_{\text{пом}}) / 2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{1-2}$  – среднеинтегральная излучательная способность поверхности пластины, окрашенной белой краской, определяемая интегрированием аппроксимирующей функции, представленной на рис. 4 (кривая 5);  $T_{\text{пом}}$  – температура воздуха в помещении равная 22,14 °С;  $\varphi_{1-2}$  – угловой коэффициент излучения с поверхности пластины в большой объем помещения, равный 1;  $F_1$  – площадь поверхности пластины, м<sup>2</sup>.

Конвективная составляющая теплового потока определяется согласно [10]:

$$\text{Nu} = 0,75 (\text{Gr}_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0,25}; \quad (6)$$

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} F_1 (T_{\text{пов}} - T_{\text{пом}}), \quad (7)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, определяемый по формуле  $\alpha_{\text{к}} = (\lambda_{\text{в}} \text{Nu}) / l$ ;  $\lambda_{\text{в}}$  – теплопроводность воздуха Вт/(м·К);  $l$  – характерный линейный размер, являющийся высотой пластины, м.

Мощность нагревательного элемента  $W$ , измеренная с помощью ваттметра, составляет 21 Вт. Лучисто-конвективный тепловой поток  $Q_{\Sigma\text{л}} = 11,38$  Вт, исходящий с исследуемой (лицевой) стороны пластины, определен по формулам (4)–(7). Предполагается, что поток с тыльной стороны пластины практически не отличается от потока с лицевой стороны. На этом основании величина лучисто-конвективного теплового потока, исходящего со всех поверхностей пластины, составляет  $Q_{\Sigma} = 22,76$  Вт.

Результат сравнения полученных значений  $W$  и  $Q_{\Sigma\text{л}}$  показывает, что эти величины отличаются друг от друга не более чем на 10 %. Следовательно, предложенная методика определения направленной излучательной способности может быть применена для определения величины направленной излучательной способности лакокрасочных материалов на основе кремнийорганических смол.

**Результаты исследования.** В ходе исследования получены экспериментальные данные температуры поверхности пластины, окрашенной термостойкой эмалью различных цветов, с использованием контактных датчиков и пирометра. На основании полученных экспериментальных данных температуры и зависимостей из опубликованной литературы получены значения величины направленной излучательной способности для эмалей разных цветов.

Анализ графиков (рис. 3 и 4) показывает, что направленные излучательные способности эмалей одинакового состава, но различного цвета различаются несущественно. Таким образом, при проектировании теплообменных аппаратов с покрытием на основе кремнийорганических

смола можно выбирать любой цвет покрытия, поскольку он оказывает незначительное влияние на эффективность аппарата с точки зрения максимизации исходящего теплового потока.

**Выводы.** Разработанные в ходе исследования экспериментальная установка для измерения температуры поверхности пластины контактным (при помощи датчиков DS18B20) и бесконтактным (при помощи пирометра БТ 350) методом, а также методика определения направленной излучательной способности лакокрасочных покрытий, применяемых для окраски конвективных поверхностей теплообменных аппаратов (включая отопительные приборы), основанная на разнице значений температур, снятых датчиками и пирометром, позволили установить, что разница в значениях температур, полученных разными методами, обусловлена зависимостью величины направленной излучательной способности от направления излучения.

Анализ полученных графиков зависимости направленной излучательной способности термостойкой эмали от угла излучения при постоянной температуре нагрева поверхности показал, что цвет покрытия оказывает незначительное влияние на энергоэффективность теплообменного аппарата.

#### Список литературы

1. **Оценка** влияния направленной излучательной способности на величину радиационно-конвективного теплового потока, исходящего от конвектора // В.С. Глазов, Ч.А. Кадыров, А.Д. Лобов, С.Л. Плечев // Промышленная энергетика. – 2025. – № 10. – С. 51.
2. **Сперроу Э.М., Сесс Р.Д.** Теплообмен излучением: пер. с англ. – Л.: Энергия, 1971. – 282 с.
3. **Зигель Р., Хауэлл Дж.** Теплообмен излучением: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 936 с.
4. **Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.** Теплообмен излучением. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
5. **Schmidt E., Eckert E.** Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen // Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. – Juli/August 1935. – Bd. 6, Heft 4. – S. 175–183.
6. **Минкин Д.А., Кораблев В.А., Шарков А.В.** Экспериментальное исследование степени черноты поверхности металлических образцов // Вестник Санкт-Петерб. ун-та ГПС МЧС России. – 2016. – № 1. – С. 18–23. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-stepeni-chernoty-poverhnosti-metallicheskih-obraztsov>
7. **Термостойкая** эмаль Elcon Max Therm: технические условия ТУ 2312-237-05763441-98 [Электронный ресурс]: паспорт продукта / ООО «Элкон». – URL:

<https://elcon.ru/upload/iblock/460/lx41xbwnmfqag5tarq2yx8jel6lmjzq.pdf>

8. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
9. **Богословский В.Н.** Строительная теплофизика. – М.: Высш. шк., 1982. – 416 с.
10. **Авчухов В.В., Паюсте Б.Я.** Задачник по процессам теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

#### References

1. Glazov, V.S., Kadyrov, Ch.A., Lobov, A.D., Plechev, S.L. Otsenka vliyaniya napravlennoy izluchatel'noy sposobnosti na velichinu radiatsionno-konvektivnogo teplovogo potoka, iskhodyashchego ot konvektora [Assessment of the Influence of Directional Emissivity on the Radiative–Convective Heat Flux from a Convector]. *Promyshlennaya energetika*, 2025, no. 10, p. 51.
2. Sperrou, E.M., Sess, R.D. *Teploobmen izlucheniem* [Radiation Heat Transfer]. Leningrad: Energiya, 1971. 282 p.
3. Zigel', R., Khauell, Dzh. *Teploobmen izlucheniem* [Thermal Radiation Heat Transfer]. Moscow: Mir, 1975. 936 p.
4. Blokh, A.G., Zhuravlev, Yu.A., Ryzhkov, L.N. *Teploobmen izlucheniem. Spravochnik* [Radiation Heat Transfer: A Handbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 384 p.
5. Schmidt, E., Eckert, E. Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, July/August 1935, vol. 6, no. 4, pp. 175–183.
6. Minkin, D.A., Korablev, V.A., Sharkov, A.V. Eksperimental'noe issledovanie stepeni chernoty poverkhnosti metallicheskih obraztsov [Experimental study of the emissivity of metal sample surfaces]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii*, 2016, no. 1, pp. 18–23. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-stepeni-chernoty-poverhnosti-metallicheskih-obraztsov>
7. **Термостойкая эмаль Elcon Max Therm: технические условия ТУ 2312-237-05763441-98: паспорт продукта** [Heat-resistant enamel Elcon Max Therm: Technical Specifications TU 2312-237-05763441-98: product passport]. ООО «Elkon». Available at: <https://elcon.ru/upload/iblock/460/lx41xbwnmfqag5tarq2yx8jel6lmjzq.pdf>
8. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p.
9. Bogoslovskiy, V.N. *Stroitel'naya teplofizika* [Building Thermal Physics]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1982. 416 p.
10. Avchukhov, V.V., Payuste, B.Ya. *Zadachnik po protsessam teploobmena* [Problem Book on Heat and Mass Transfer Processes]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 256 p.