



УДК 536.3: 536.6

**STATIONARY MEASUREMENT SYSTEM FOR EMISSIVITY
COEFFICIENT DETERMINATION BASED ON THERMAL METHODS
СТАЦІОНАРНІ ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СТУПЕНЮ ЧОРНОТИ
ТЕПЛОВИМИ МЕТОДАМИ**

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й

d.t.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.

ORCID: 0000-0001-7958-6996

SPIN: 6154-2069

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Zhelyabova Str., 2a, Kyiv, 03057**Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Желябова, 2а, 03057*

Dekusha O.L. / Декуша О.Л.

s.t.s. / к.т.н.

ORCID: 0000-0003-3836-0485

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Zhelyabova Str., 2a, Kyiv, 03057**Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Желябова, 2а, 03057*

Dekusha L.V. / Декуша Л.В.

*d.t.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.**Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Zhelyabova Str., 2a, Kyiv, 03057**Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Желябова, 2а, 03057*

Kovtun S.I. / Ковтун С.І.

d.t.s. / д.т.н.

ORCID: 0000-0002-6596-3460

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Zhelyabova Str., 2a, Kyiv, 03057**Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Желябова, 2а, 03057*

Анотація. В роботі розглянуто теплові методи визначення ступеню чорноти покриттів та поверхонь матеріалів та відповідні стаціонарні прилади, створені в Інституті технічної теплофізики НАН України. Надано інформацію про структуру та принцип дії приладів, методику опрацювання вимірювальної інформації. Наведено результати вимірювань ступеню чорноти (коефіцієнту емісії) поверхні деяких матеріалів та спеціальних покриттів.

Ключові слова: ступінь чорноти, коефіцієнт емісії, радіаційний теплообмін, калориметричний метод.

Вступ. Випромінювання сірих тіл відповідає закону Стефана – Больцмана [1, 2], який встановлює залежність густини інтегрального напівсферичного випромінювання від температури:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Вт/м}^2), \quad (1)$$

де: q - густина інтегрального напівсферичного випромінювання;

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (Вт/м²·К⁴) стала Стефана - Больцмана;

ε – ступінь чорноти, коефіцієнт випромінювання, коефіцієнт емісії, emissivity.

Інтегральний ступінь чорноти є відношенням випромінювальної здатності реального тіла до випромінювальної здатності чорного тіла при тій же температурі.

Визначення коефіцієнту емісії актуальне для всіх випадків дослідження,



розрахунку та моделювання радіаційного теплообміну, зокрема при визначенні властивостей енергоефективного скла та вікон, покриття елементів космічної техніки, при проведенні пірометричних та тепловізійних вимірювань.

Для реальних тіл коефіцієнт емісії є складною функцією, яка залежить від природи тіла що випромінює, його температури, стану поверхні, а для металів - від ступеню окиснення цієї поверхні. Для чистих металів з полірованою поверхнею коефіцієнт емісії має низькі значення. При температурі до 100°C значення коефіцієнту емісії полірованої поверхні металу не перевищує 0,1. З появою оксидних плівок на поверхні металу коефіцієнт емісії різко збільшується і може приймати значення більші за 0,5. Коефіцієнт емісії напівпровідникових матеріалів при температурі 100°C більше ніж 0,8.

Ступінь чорноти покриття чи матеріалу значною мірою визначає інтенсивність радіаційного теплообміну на поверхні досліджуваного об'єкта, тому його експериментальне визначення важливе для забезпечення необхідних теплозахисних характеристик конструкцій. При створенні сучасних енергоефективних вікон та склопакетів застосовують низкоемісійне скло, яке забезпечує зменшення радіаційної складової теплообміну і, відповідно, збільшення опору теплопередаванню у порівнянні зі звичайними світлопрозорими конструкціями. Для космічних апаратів, навпаки, оболонка супутника повинна сприяти розсіюванню у просторі теплоти, що виділилася у бортовій апаратурі, тобто, ступінь чорноти поверхні апарату повинен бути наближеним до одиниці для інфрачервоного випромінювання, але мати низький коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання. При впровадженні технології виготовлення енергоефективного скла та оболонок для космічних апаратів, а також для визначення характеристик поверхонь при застосуванні готових виробів актуальним є проведення вимірювання ступеню чорноти (коефіцієнту емісії).

Огляд відомих методів та приладів. Проблема створення прогресивних теплозберігаючих технологій, матеріалів із заданим ступенем чорноти та засобів вимірювання цього параметру є актуальною у всьому світі. Відомі декілька методів експериментального визначення коефіцієнту емісії. Їх можна розділити на дві великі групи: оптичні та теплові. На рисунку 1 наведена спрощена класифікація методів та приладів для визначення коефіцієнту емісії.

Серед оптичних методів найбільш відомим та розповсюдженим є спектрометричний. Методика спектрометричного дослідження скла з покриттям надана у відповідних стандартах [3]. Суть методу полягає у визначенні спектральної кривої дзеркального відбиття, обмірюваної при куті падіння пучка випромінювання, близькому до нормального, і обчисленні нормальної випромінювальної здатності поверхні ϵ_n . Нормальне відбиття R_n визначають обчисленням математичного середнього з 30 значень коефіцієнта відбиття R_i за формулою:

$$R_n = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} R_i(\lambda_i) ,$$

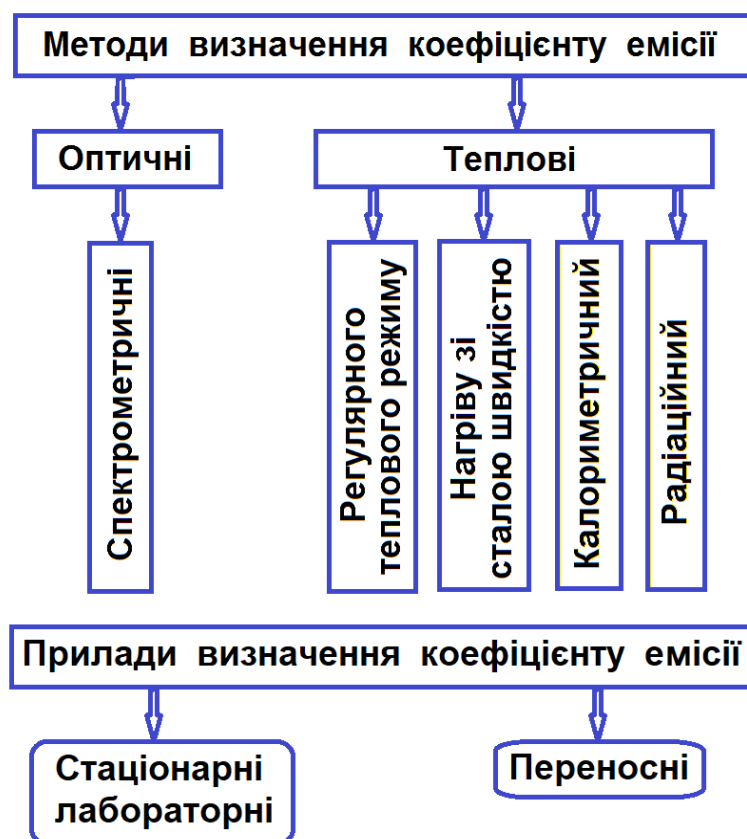


Рис. 1 Класифікація методів та приладів для визначення коефіцієнту емісії

де R_i – коефіцієнт відбиття світла; λ_i – довжина хвилі у діапазоні 5 мкм – 50 мкм.

Нормальну випромінювальну здатність ε_n визначають за формулою:

$$\varepsilon_n = 1 - R_n \quad ,$$

де R_n – нормальне відбиття.

Напівсферичний ступінь чорноти ε визначають множенням нормальної випромінювальної здатності ε_n на коефіцієнт A , значення якого залежить від визначеного значення ε_n та наведено у [3].

Як слідує з наведеної спектрометричної методики вимірювань, для її реалізації необхідне досить складне і коштовне обладнання, а результат отримують шляхом розрахунків з використанням емпіричних поправочних коефіцієнтів. Таким чином, цей метод вимірювань є непрямим.

Серед теплових методів експериментального визначення коефіцієнту емісії розповсюдження набули наступні: радіаційний, калориметричний, метод регулярного режиму, метод неперервного нагріву зі сталою швидкістю. У всіх методах переніс теплоти за рахунок конвекції та теплопровідності повітря повинен бути дуже малим у порівнянні з випромінюванням.

Радіаційний метод є відносним методом [2]. Він базується на порівнянні випромінення досліджуваного тіла з випроміненням абсолютно чорного або іншого еталонного тіла з відомим коефіцієнтом випромінення. Наприклад,



застосовується приймальний пристрій, в якому розміщена диференціальна термопара. Один зі спаїв термопари приймає випромінення від досліджуваного тіла, а інший - з поверхні еталонного тіла. За результатом вимірювання сигналу термопари визначають коефіцієнт емісії.

Калориметричний метод заснований на безпосередньому вимірюванні потоку випромінювання від досліджуваного тіла [2]. Такий метод є абсолютним. Коефіцієнт емісії визначають виходячи із закону Стефана-Больцмана.

Метод регулярного теплового режиму заснований на законах регулярного теплового режиму для тіла, теплообмін якого є тільки радіаційним [2]. Для такого випадку коефіцієнт емісії пропорційний до темпу охолодження, який визначають звичайним для регулярного режиму методом.

У методі нагріву зі сталюю швидкістю [2] зразок досліджуваного матеріалу простої геометричної форми (наприклад, циліндр) розміщують всередині масивного циліндричного блоку, який слугує для створення рівномірного температурного поля навколо зразка. Теплообмін між зразком та блоком здійснюється лише за рахунок теплового випромінення. Масивний блок нагрівають так, щоб швидкість нагріву зразка була сталюю в умовах обмеження числа Біо $Bi \leq 0,1$. Коефіцієнт емісії знаходять з рівняння теплового балансу для зразка, спираючись на значення швидкості нагріву зразка, його теплоємність та коефіцієнт випромінення масивного блоку.

Прилади для визначення коефіцієнта емісії можна класифікувати за різними признаками, але найбільш вживаною є класифікація за умовами застосування - стаціонарні лабораторні та переносні прилади.

Провідні позиції в області визначення терморадіаційних характеристик належать фірмам США - Surface Optics Corporation, NASA/Goddard Space Flight Center, AZ Technology Corporation, Німеччині - Fraunhofer-Institute for Building Physics, Чехії - Institute of Scientific Instruments, Brno, Китаю - Beijing Aoptek Scientific Co.,Ltd. В Росії дослідженнями термооптичних характеристик та їх вимірюваннями займаються у ЦАГІ, Москва, Сибірському НДІ метрології, Новосибірськ [4...12].

Стаціонарні лабораторні прилади, як правило, забезпечують вимірювання у широкому температурному діапазоні при вакуумуванні робочої камери для зменшення кондуктивно-конвективної складової теплообміну. Приклад такої установки, призначеної для вимірювання терморадіаційних характеристик в діапазоні температури від 20 К до кімнатної, наведений у роботі [4]. Застосовано калориметричний криогенний метод для вимірювання інтегральних напівсферичних коефіцієнтів емісії та поглинання різних матеріалів при температурах від 320К до 20К. При вимірюванні поглинання температура досліджуваного зразка становить приблизно 5 К...35 К. За допомогою вимірювання перепаду температури на тепловому резисторі (тепломірі) визначається радіаційний тепловий потік між двома плоскими паралельними поверхнями у вигляді дисків діаметром 40 мм, які розміщені у вакуумі. Досліджуваний зразок і диск-референт з поверхнею, що має відомі характеристики, занурюються у ванну, яка охолоджується рідким гелієм (LHe).



Тепловий потік вимірюється за методом заміщення, з використанням теплової потужності від електричного нагрівача для калібрування тепломіру. Велика увага приділяється оцінці невизначеності вимірювань, що виникає при застосуванні цього способу. Можливості приладу продемонстровано вимірюванням коефіцієнтів поглинання та випромінювання зразка чистого алюмінію. Розширена невизначеність ($k = 2$) вимірювання коефіцієнту емісії $\varepsilon = 0,0041$, вимірюваного при $\approx 30\text{K}$ для чистого алюмінію, становить менше 11%, а для значень коефіцієнту емісії $\varepsilon > 0,0053$, що вимірюється за температури вище 60 K, невизначеність нижче 7%. Метод був розроблений, перш за все, для досліджень матеріалів з малим значенням коефіцієнту емісії, таких як чисті метали, проте висока випромінювальна здатність еталонного зразка також дозволяє досліджувати неметалічні матеріали з розумною точністю.

Основний текст.

В Інституті технічної теплофізики НАН України створені прилади та методики проведення вимірювань тепловими методами напівсферичного ступеню чорноти.

Методика визначення ступеню чорноти із застосуванням приладу ИТ-7С. Прилад ИТ-7С призначений для вимірювання теплового опору та теплопровідності зразків теплоізоляційних та будівельних матеріалів методом пластини [13]. Створена методика вимірювань дозволяє використовувати його і для визначення ступеню чорноти скла та інших плоских зразків. Для проведення вимірювань терморадіаційних характеристик скла та покриттів формують дослідний зразок (рис. 2) у вигляді блоку (пакету) з стекл з повітряним проміжком заданої величини $h_{\text{пов}}$. Два зразки скла розташовують паралельно один до іншого, при цьому сторони з покриттям повинні бути всередині, тобто знаходяться один напроти одного. Пакет встановлюють в вимірювальну комірку теплового блоку установки ИТ-7С і задають значення температури нагрівника $T_{\text{наг}}$ і холодильника $T_{\text{хол}}$ блоку таким чином, щоб перепад температури на поверхнях дослідного пакету становив приблизно 10 K. У стаціонарному режимі вимірюють різницю температур на верхній і нижній поверхнях пакету стекл і густину теплового потоку, що проходить крізь цей пакет.

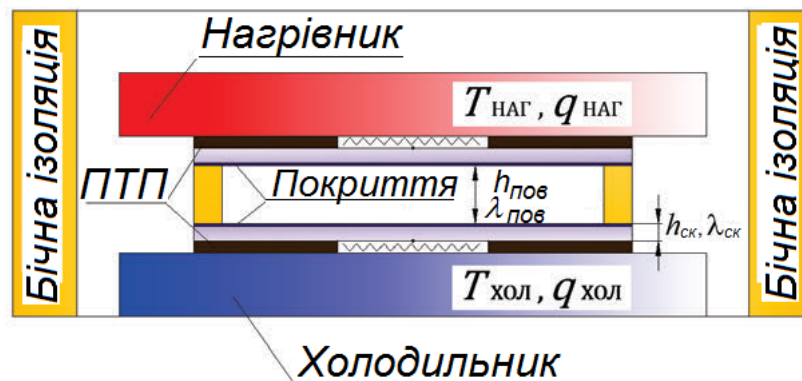


Рис. 2. Схема розміщення дослідного пакета у вимірювальній комірці теплового блоку приладу ИТ-7С.



На підставі проведених вимірювань розраховують тепловий опір пакету та значення приведенного коефіцієнту емісії $\varepsilon_{ПР}$ для двох паралельних зразків, що утворюють його.

$$\varepsilon_{ПР} = \left[\left(\frac{\Delta T}{q_{ср}} - \frac{2h_{ск}}{\lambda_{ск}} \right)^{-1} - \frac{\lambda_{нов}}{h_{нов}} \right] / 4\sigma \cdot T_{ср}^3, \quad (2)$$

де ΔT - різниця температури між поверхнями ПТП; $q_{ср}$, $T_{ср}$, - середні значення теплового потоку крізь пакет та його температури; $h_{ск}$, $h_{нов}$ - товщини скла та повітряного прошарку; $\lambda_{ск}$, $\lambda_{нов}$ - теплопровідності скла та повітряного прошарку.

Коефіцієнт емісії поверхні енергоефективного скла (покриття) $\varepsilon_{ПОВ}$ розраховують за формулою: $\varepsilon_{ПОВ} = 2 \cdot (\varepsilon_{ПР}^{-1} + 1)^{-1}$.

Створена методика робить прилад ИТ-7 універсальним засобом дослідження будівельних матеріалів і дозволяє застосовувати його для вимірювання теплового опору, теплопровідності та ступеню чорноти поверхонь зразків.

Методика визначення ступеню чорноти із застосуванням установки РГУ-2. Основне призначення радіаційної градууювальної установки РГУ-2 [14] - радіаційне градуювання та калібрування перетворювачів (сенсорів) теплового потоку. Структура теплового блоку установки РГУ-2 та зовнішній вигляд представлені на рисунку 3.

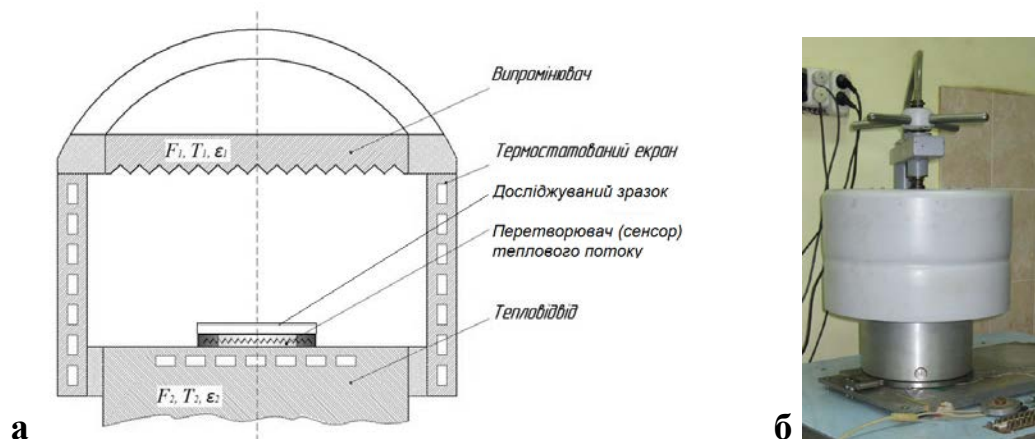


Рис. 3. Структура теплового блоку установки РГУ-2 (а) та його зовнішній вигляд (б).

Робоча камера установки утворюється при встановленні випромінювача на поверхню тепловідводу (холодильника), на яку встановлюють досліджувані зразки. Робоча камера обмежена дзеркальними боковими стінками, які мають таку ж температуру як тепловідвід, внаслідок чого від них відбивається випромінювання і створює центральну зону відносно рівномірної густини на поверхні холодильника. Плита тепловідводу та порожнистий циліндр, що утворює бокові стінки мають вбудовані канали, в яких циркулює вода від рідинного термостата, завдяки чому підтримується їх однакова температура. У



такій системі гарячий випромінювач розташований над перетворювачами зі зразками і відстоїть від них на достатньо великій відстані, тому вплив кондуктивного-конвективного теплопередавання є незначним, що підтверджено проведеним комп'ютерним моделюванням складного теплообміну у робочій камері [15].

Проведені дослідження можливості застосування установки РГУ-2 для вимірювання інтегрального напівсферичного коефіцієнту емісії. Тепловий потік, що поглинається поверхнею досліджуваного зразка та проходить крізь нього, вимірюється за допомогою перетворювача теплового потоку (ПТП), а тепловий потік, який надходить на поверхню вимірюється розташованим поряд еталонним перетворювачем з відомим ступенем чорноти поверхні. Оскільки фактично проводиться порівняння теплових потоків, що сприймаються поверхнями з різним ступенем чорноти, застосований метод вимірювань є комбінацією радіаційного та калориметричного. Ступінь чорноти поверхні досліджуваного зразка чи покриття ε_x може бути розрахований за формулою:

$$\varepsilon_x = \frac{q_x}{\frac{q_{em}}{\varepsilon_{em}} + \sigma(T_{em}^4 - T_x^4)}, \quad (3)$$

де q - виміряна густина теплового потоку; T - температура поверхні; індекс *em* відноситься до еталонного зразка матеріалу і його ПТП, а індекс *x* - до досліджуваного зразка матеріалу і його ПТП.

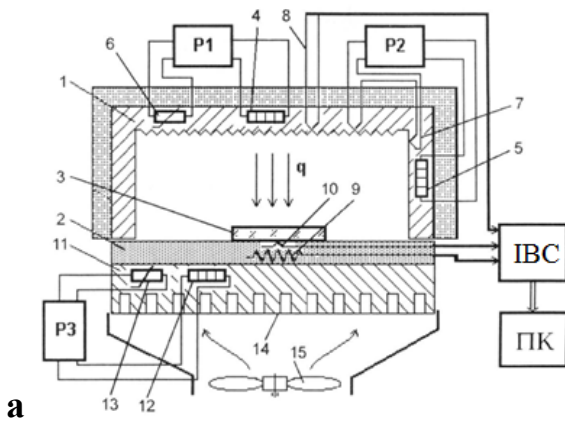
При температурах, близьких до кімнатної та різниці температур не більше 20 К, може застосовуватися спрощена формула розрахунку: $\varepsilon_x = \varepsilon_{em} \cdot \frac{q_x}{q_{em}}$.

Для розглянутих вище приладів ИТ-7 та РГУ-2 вимірювання ступеню чорноти є додатковою функцією, яка розширює діапазон їх можливостей. Розроблено також спеціалізований прилад, який призначено саме для визначення терморадіаційних властивостей поверхонь тепловими методами.

Установка ІТРС для визначення напівсферичних терморадіаційних характеристик. В установці ІТРС бокові стінки робочої камери - чорні та мають температуру випромінювача, що забезпечує зону рівномірності на холодильнику більшого радіусу. Ця установка дозволяє проводити вакуумування робочої порожнини, що повністю виключає вплив конвективної складової теплообміну. Установка дозволяє проводити як абсолютні вимірювання, так і порівняльні - за наявності зразка з відомим коефіцієнтом емісії. На рисунку 4 наведена спрощена структура системи та фотографія зовнішнього вигляду.

До складу установки входять чотири блоки: тепловий 1, вимірювальний 2, електронних регуляторів 3 та вакуумування 4 і персональний комп'ютер 5, з'єднані кабелем зв'язку (див. рис. 4 б).

У тепловому блоці установки (рис. 4 а) джерело теплового випромінювання ДТВ 1 і основа 2 виконані з високотеплопровідного металу (дюралюмінію Д16Т) і утворюють замкнутий простір. Внутрішня поверхня випромінювача (циліндр і дно), звернена до основи, вкрита дрібними V-подібними канавками і



б

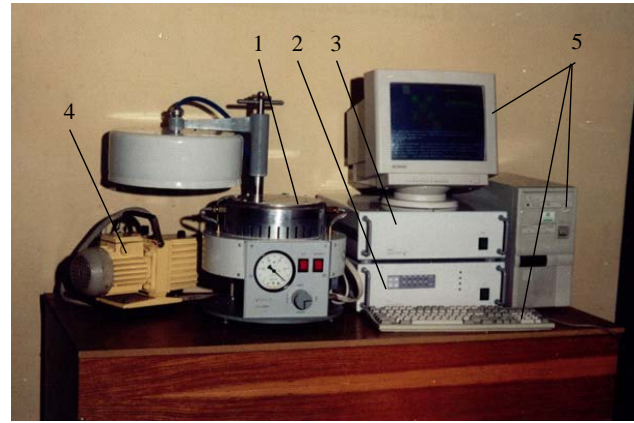


Рис. 4. Спрощена структура системи (а) та фотографія зовнішнього вигляду (б).

має чорне покриття, що забезпечує коефіцієнт емісії (ступінь чорноти) $\epsilon_{ДТВ}$ не менше 0,95. Основа і випромінювач мають вбудовані елементи, що дозволяють підтримувати задані значення температури цих вузлів - нагрівачі, канали для теплоносія, перетворювачі температури і т.п. На поверхні основи 2, зверненої до випромінювача 1, розташована пластина термоперетворювачів 3, в центральній зоні якої розташовані декілька ПТП і перетворювачів температури поверхні, так, щоб можна було над ними розташувати одночасно кілька досліджуваних зразків. У випромінювачі ДТВ розташований термоелектричний перетворювач температури поверхні випромінювача.

Аналітичне дослідження розподілу теплових потоків і температури у робочій камері [16] свідчить, що у центральній зоні основи, обмеженій 70% радіусу робочої камери, розподіл густини випромінення є рівномірним та напівсферичним, з наявності повітря, кондуктивний тепловий потік крізь нього такий же, як між двома нескінченими пластинами.

Режими виміру терморадіаційних характеристик поверхонь досліджуваних зразків реалізуються при малих (до 15 К) значеннях різниці температур ДТВ і досліджуваного зразка. У цьому випадку коефіцієнт випромінювання поверхні досліджуваного зразка можна вважати рівним коефіцієнту поглинання [1, 2]. Оскільки металеві підкладки напиленних зразків покриттів в довгохвильовій області спектра є непрозорими для інфрачервоного випромінювання, коефіцієнт відбиття поверхні визначається зі співвідношення: $R = 1 - \epsilon$.

Температуру безпосередньо на поверхні досліджуваного зразка незручно вимірювати контактним способом, так як це може призвести до спотворення радіаційної складової теплообміну. Тому вимірюють температуру за допомогою спаю термопари, розташованого на поверхні ПТП, а температуру поверхні досліджуваного зразка T_4 розраховують з урахуванням теплопровідності зразка λ_4 за формулою:

$$T_4 = T_3 + q_{ПТП} \times \left(\Delta R_T + \frac{H_{3P}}{\lambda_4} \right), \quad (4)$$



де T_3 - температура поверхні ПТП; ΔR_T - додатковий тепловий опір між спаєм термопари і зразком, $H_{ЗР}$, λ_4 - товщина та теплопровідність зразка.

При вимірюваннях попередньо визначають теплопровідність і товщину зразка досліджуваного матеріалу 4, а потім встановлюють зразки на поверхню пластини термоперетворювачів 3 за допомогою тонкого шару теплопровідних мастила. Встановлюють теплові режими ДТВ та основи і після їх стабілізації вимірюють середні значення температури і теплового потоку. Значення температури поверхні зразка визначають за формулою (4), значення радіаційної складової теплового потоку знаходять як різницю між вимірним тепловим потоком крізь зразок та тепловим потоком за рахунок кондуктивного теплопередавання крізь повітряний прошарок.

Значення коефіцієнта емісії поверхні зразка розраховують за формулою:

$$\varepsilon_{ЗР} = \frac{q_{РАД}}{\sigma(T_1^4 - T_4^4) - q_{РАД} \times \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ДТВ}} - 1 \right)}, \quad (5)$$

$$\text{де } q_{РАД} = q_{ПТП} - (T_1 - T_4) \times \frac{\lambda_{ПОВ}}{H_{П} - H_{ЗР}};$$

$\frac{F_1}{F_2}$ - відношення площ поверхні випромінювача і приймальні поверхні

основи; $H_{П}$ - відстань між поверхнями випромінювача ДТВ і пластиною термоперетворювачів.

Середні значення $q_{ПТП}$, T_1 і T_3 визначають безпосередньо за результатами вимірювань під час експерименту. Значення F_1/F_2 , $\varepsilon_{ДТВ}$ і ΔR_T , визначають при проектуванні і калібруванні приладу. Відстань між поверхнями випромінювача 2 і пластиною термоперетворювачів 3 задано конструкцією приладу.

Оскільки прилад дозволяє одночасно встановлювати кілька зразків, то проводять визначення густини теплового потоку і температури поверхні для кожного зразка, а розрахунок коефіцієнтів емісії проводять окремо для кожного зразка за формулами аналогічним (5). Одночасне дослідження декількох зразків дозволяє швидко порівнювати між собою зразки при відпрацюванні технології нанесення покриттів. У разі наявності еталонних зразків з відомими терморадіаційними характеристиками можливо звірення з ними досліджуваних зразків. Застосування методики вимірювань з використанням двох еталонних зразків з контрастними значеннями їх коефіцієнтів випромінювання (перший зразок - з покриттям з полірованого металу $\varepsilon_{e1} \approx 0,1$, а другий - з діелектрика з матовою поверхнею $\varepsilon_{e2} \approx 0,9$) дозволяє компенсувати кондуктивну і конвективну складові теплообміну через повітряний зазор, в зв'язку з чим відпадає необхідність врахування кондуктивного теплопередавання крізь повітря.

Результати вимірювань терморадіаційних характеристик (ТРХ) матеріалів для віконних конструкцій.



Енергозберігаюче віконне скло повинне, з одного боку, мати високий коефіцієнт пропускання у видимій частині спектру, а з іншого боку, мати мінімальне значення випромінювальної здатності (ступеня чорноти, коефіцієнта емісії) в інфрачервоній області спектра, характерній для теплообміну випромінюванням при температурі, близької до кімнатної. Також для підвищення енергоефективності вікон випускають полімерні плівки, що відбивають інфрачервоне випромінювання. Із застосуванням розроблених приладів проведені дослідження ТРХ таких матеріалів, результати вимірювань наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати вимірювань ТРХ матеріалів для віконних конструкцій

Матеріал	ступінь чорноти (коефіцієнт емісії) ϵ	коефіцієнт віддзеркалення R
Скло:		
віконне	0,90...0,92	0,08...0,10
матове	0,93...0,95	0,05...0,07
k - скло	0,23	0,77
i - скло	0,11...0,12	0,88...0,89
Плівки:		
“Solis-85”	0,38	0,62
“Solar-guard 35”	0,31	0,69
“Solar-guard 50”	0,35	0,65
“Heat mirror 77”	0,071	0,929
“HPR	0,045	0,955

Отримані результати добре відповідають даним технічної літератури.

Результати та висновки. Розроблено методики вимірювання ступеню чорноти радіаційним та калориметричним методом за допомогою раніше створених приладів ИТ-7 та РГУ-2. Створено спеціалізовану установку ІТРС для визначення напівсферичних терморадіаційних характеристик тепловими методами. Проведено експериментальні дослідження ступеня чорноти матеріалів для енергоефективних віконних конструкцій.

Література.

1. Уонг, Х. (1979). Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат. 212с.
2. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. (1975). Теплопередача. Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Энергия». 488 с.
3. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
4. Králík, T., Musilová, V., Hanzelka, P., & Frolec, J. (2016). Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures/ Metrologia. 53, 743–753. Retrieved from: doi:10.1088/0026-1394/53/2/743



5. Emissometer Model AE1. Режим доступа: <http://www.devicesandservices.com/AE1%20Spec%20Sheet.pdf>
6. Portable Emissometer/Reflectometer TEMP 2000A. Режим доступа: <http://www.aztechnology.com/optical-instruments-temp2000a.html>
7. ET-100 Thermal Handheld Emissometer. Режим доступа: <https://surfaceoptics.com/products/reflectometers-emissometers/et100-thermal-handheld-emissometer/>
8. Рекант, Н.Б., Демидов, С.А., Хрусталева, Б.А., & Князева, З.А. (1981). Устройства для измерений относительной излучательной способности (степени черноты) материалов и покрытий при комнатной температуре. Промышленная теплотехника. Т.3, № 1. С. 13 - 19.
9. Халиманович, В., Харламов, В., Ермолаев, Р., Михеев, А., & Гирн, А. (2009). Испытания лабораторных образцов терморегулирующих покрытий углепластиковых элементов космических аппаратов. Вестник СибГАУ. №3. С. 110 – 113.
10. Михеев, А., Гирн, А., Ивасев, С., & Евкин, И. (2013). Исследование свойств защитных покрытий для космических аппаратов. Вестник СибГАУ. № 3(49). С. 217 – 224.
11. Падерин, Л., Прусов, Б., & Токарев, О. (2011). Установка для исследований интегральной полусферической излучательной способности теплозащитных материалов и терморегулирующих покрытий. Ученые записки ЦАГИ. Т. XLII, №1. С. 53 – 61.
12. Черепанов, В. (2005). Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов. Интерэкспо Гео-Сибирь. т. 6. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodov-i-sredstv-metrologicheskogo-obespecheniya-izmereniy-koeffitsientov-teplovogo-izlucheniya-materialov>.
13. Бурова З.А., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Шаповалов В.И. Повышение точности измерения теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов//Пром. теплотехника, 2010. № 1. – С. 113-121.
14. Декуша, Л.В., Грищенко, Т.Г., & Зайцев, В.Б. (2003). Установка для радиационной градуировки преобразователей теплового потока. *Промышленная теплотехника*. Т.25, № 44 (приложение к журналу). С. 462 – 464.
15. Babak V., Dekusha O., Vorobiov L., Dekusha L., Kobzar S., Ivanov S. The Heat Exchange Simulation In The Device For Measuring The Emissivity Of Coatings And Material Surfaces. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). p. 301-304. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537
16. Ковтун, С., Декуша, Л., & Воробйов, Л. (2018). Аналізування впливу параметрів випромінювача на передавання одиниці вимірювання теплового потоку. *Slovak international scientific journal*, 16(1), P. 51–54.

References:

1. Uong, X. (1979). Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlja inzhenerov. [Basic formulas and data on heat transfer for engineers]. Moscow: Atomizdat, 212p. (in Russian).
2. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. (1975). *Teploperedacha*. Uchebnik dlya



- vuzov. [Transmission. Textbook for universities], ed. 3rd. Moscow: "Energy". 488 p. (in Russian).
3. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
 4. Králík, T., Musilová, V., Hanzelka, P., & Frolec, J. (2016). Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures/ *Metrologia*. 53, 743–753. Retrieved from: doi:10.1088/0026-1394/53/2/743
 5. Emissometer Model AE1. Retrieved from: <http://www.devicesandservices.com/AE1%20Spec%20Sheet.pdf>
 6. Portable Emissometer/Reflectometer TEMP 2000A. Retrieved from: <http://www.aztechnology.com/optical-instruments-temp2000a.html>
 7. ET-100 Thermal Handheld Emissometer. Retrieved from: <https://surfaceoptics.com/products/reflectometers-emissometers/et100-thermal-hand-held-emissometer/>
 8. Recant, N.B., Demidov, S.A., Khrustalev, B.A., & Knyazeva, Z.A. (1981). Ustroystva dlya izmereniy odnositel'noy izluchatel'noy sposobnosti (stepeni chernoty) materialov i pokrytiy pri komnatnoy temperature. [Devices for measuring the relative emissivity (emission factor) of materials and coatings at room temperature]. *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*. V.3, No. 1. P. 13 - 19.
 9. Halimanovich, V. I., Harlamov, V. A., Ermolaev, R. A., Miheev, A. E., & Girn, A. V. (2009). Ispytaniya laboratornykh obrazcov termoreguliruyushchih pokrytij ugleplastikovykh jelementov kosmicheskikh apparatov [Testing laboratory patterns with thermoregulation coating on carbon details of space vehicles]. *Vestnik SibGAU*, 3, 110–113 (in Russian).
 10. Miheev, A. E., Girn, A. V., Ivasev, S. S., & Evkin, I. V. (2013). Issledovanie svojstv zashhitnykh pokrytij dlja kosmicheskikh apparatov [Investigation of the space vehicles coatings feature]. *Vestnik SibGAU*, 3(49), 217–224 (in Russian).
 11. Paderin, L. Ja., Prusov, B. V., & Tokarev, O. D. (2011). Ustanovka dlja issledovanij integral'noj polusfericheskoj izluchatel'noj sposobnosti teplozashhitnykh materialov i termoreguliruyushchih pokrytij [Installation for studies of the integral hemispherical emissivity of heat-shielding materials and thermoregulatory coatings]. *Uchenye zapiski CAGI*, 1, 53–61 (in Russian).
 12. Cherepanov, V. (2005). Razrabotka metodov i sredstv metrologicheskogo obespechenija izmerenij koeficientov teplovogo izlucheniya materialov [Development of methods and tools for metrological support of measurements of thermal radiation coefficients of materials]. *Interjekspos Geo-Sibir'*, 6 (in Russian).
 13. Burova Z.A., Vorobyev L.I., Grishchenko T.G., Dekusha L.V., Shapovalov V.I. Povysheniye tochnosti izmereniya teploprovodnosti stroitel'nykh i teploizolyatsionnykh materialov [Improving the accuracy of measuring the thermal conductivity of building and heat-insulating materials.] *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*, 2010. No. 1. P. 113-121.
 14. Dekusha, L.V., Grishchenko, T.G., & Zaitsev, V.B. (2003). Ustanovka dlya radiatsionnoy gradirovki preobrazovateley teplovogo potoka. [Installation for radiation gradation of heat flux converters.] *Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*, V.25, No. 44 (appendix to the journal). P. 462 - 464. (in Russian).
 15. Babak V., Dekusha O., Vorobiov L., Dekusha L., Kobzar S., Ivanov S. The Heat Exchange Simulation In The Device For Measuring The Emissivity Of Coatings And Material Surfaces. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. P. 301-304. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537.
 16. Kovtun, S., Dekusha, L., & Vorobyov, L. (2018). Analizuvannya vplyvu parametriv vpromynyuvacha na peredavannya odyntsi vymiryuvannya teplovoho potoku. [Analyzing the effect of the radiator parameters on the transmission of the heat flow unit]. *Slovak international scientific journal*, 16(1), P. 51–54. (in Ukrainian).

Abstract. The paper describes the classification of optical and thermal methods for



determining emissivity coefficient of coatings and surfaces of materials. Stationary devices created at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine that implement thermal and calorimetric methods are considered. Provided Information about the structure and principle of operation of the instruments, a methodology for processing measurement information. Methods for measuring the emissivity coefficient using previously created measurement systems IT-7 and RGU-2 are developed. A specialized measurement system ITRS has been created to determine hemispherical thermal radiation characteristics by thermal methods. Experimental studies were carried out and the results of measurements of the emission coefficient of materials for energy-efficient window structures are presented.

Keywords: *emissivity, emission factor, radiation heat exchange, calorimetric method.*

Науковий керівник: чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. Бабак В.П.

Стаття підготовлена у рамках науково-технічного проекту «Створення та впровадження приладів для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів з використанням високочутливих сенсорів інфрачервоного випромінювання», що виконується відповідно до Цільової програми наукових досліджень НАН України «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління» на 2018-2020 роки».

Стаття відправлена: 08.10.2019 г.

© Воробйов Л.Й., Декуша О.Л., Декуша Л.В., Ковтун С.І.