

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ЕМІСІЇ ПОВЕРХНІ

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна, teplomer@ukr.net

Анотація. Показано актуальність створення переносного приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії (ступеню чорноти) поверхонь матеріалів та покриттів. Розглянуто принцип дії та конструкцію диференціального приладу для вимірювання коефіцієнту емісії. Чутливими елементами приладу є термоелектричні перетворювачі теплового потоку та температури. Проведено комп'ютерне моделювання процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в циліндричних робочих комірках переносного приладу. Встановлено, що завдяки диференціальній схемі приладу, просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань. Оцінені значення нелінійності та зміщення калібрувальної характеристики внаслідок конвективного теплообміну, які необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, що надходить від первинних сенсорів приладу.

Ключові слова: радіаційний теплообмін; вимірювання коефіцієнту емісії; сенсори теплового потоку.

Постановка проблеми. Проблематика вимірювань коефіцієнту емісії (ступеню чорноти) актуальна для багатьох сфер економіки. Відомо, що на теплопостачання житлових, громадських і виробничих будівель витрачається близько 40% всього видобутого органічного палива. З цієї причини вкрай важливою проблемою сьогодення є підвищення енергетичної ефективності вже побудованих споруд та розроблення інноваційного дизайну нових із застосуванням енергозберігаючих технологій. Одним з основних шляхів тепловтрат крізь теплозахисну оболонку будівель є втрати крізь вікна та віконні конструкції. У свою чергу, шляхом до забезпечення необхідного теплового режиму віконних конструкцій є оптимізація радіаційного теплообміну поверхні з навколишнім середовищем. Таким чином, підвищення теплозахисних характеристик віконних конструкцій є актуальним, має економічну та соціальну значимість. Одним з шляхів зменшення тепловтрат крізь віконні конструкції є застосування енергоефективного низькоемісійного скла і приладів для контролю його характеристик.

Іншою сферою застосування приладів для визначення коефіцієнту емісії є галузь аерокосмічної техніки. Як правило, для космічної техніки є актуальною можливість високої тепловіддачі з поверхні апарату для відведення теплоти, що виділяється при роботі вбудованого обладнання, тобто покриття повинне мати високе (близьке до 1,0) значення коефіцієнту емісії і як можна низьке значення коефіцієнта поглинання сонячного випромінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для контролю якості енергоефективного скла, вікон, світлопрозорих конструкцій при виробництві та сертифікації необхідні прилади, які дозволяють визначити коефіцієнт емісії [1]. Для вирішення завдань, що постають перед аерокосмічною технікою, створюються нові матеріали і покриття, що володіють заданими

селективними характеристиками, а також засоби визначення їх терморадіаційних характеристик [2...7].

Мета статті – аналіз принципу роботи та структури запропонованого диференціального переносного приладу для вимірювання ступеню чорноти матеріалів, визначення впливу на результати вимірювань конвективного теплообміну у комірках приладу та їх просторового розташування.

Виклад основного матеріалу. Для створення приладу експрес-контролю напівсферичного коефіцієнту емісії поверхні матеріалу або покриття без вакуумування камери з досліджуваними зразками, було запропоновано реалізувати вимірювальний блок у вигляді двох диференціально включених теплотермічних комірок з різними умовами теплообміну.

Запропонований прилад містить тепловий колектор з системою задавання температури, вимірювальний пристрій та корпус, виконаний з теплоізоляційного матеріалу, і має два світловодні канали з відбивним покриттям бокових стінок, а у торцях каналів, що прилягають до теплового колектора встановлені перетворювачі теплового потоку [7]. У прилад введені два перетворювачі температури, розташовані у тепловому колекторі, батарея елементів Пельть'є, що контактує з поверхнею колектора, регулятор температури, перетворювач температури досліджуваної поверхні з пружним притискачем та пристрій обчислення. Перетворювачі теплового потоку мають покриття з різними значеннями ступеню чорноти, перший перетворювач температури колектора підключений до регулятора температури, вихід якого підключений до батареї елементів Пельть'є, другий перетворювач температури колектора, перетворювач температури досліджуваної поверхні та перетворювачі теплового потоку підключені до вимірювального пристрою, який з'єднаний з пристроєм обчислення.

Наявність покриття з різними значеннями ступеню чорноти на перетворювачах теплового потоку

дозволяє проводити порівняння інтенсивності теплообміну в каналах, внаслідок чого значною мірою компенсувати вплив змінних умов експлуатації та кондуктивно-конвективного теплообміну в каналах. Введення в прилад системи регулювання температури колектора, в яку входять батарея елементів Пельт'є, регулятор та перший перетворювач температури колектора дозволяє встановлювати температуру колектора як вищу за температуру поверхні зразка, так і нижчу за неї, що у свою чергу, дозволяє засто-

совувати різні варіанти взаємного розташування зразка та приладу. Введення перетворювача температури поверхні зразка, що має пружний притискач, дозволяє забезпечити надійний тепловий контакт перетворювача з поверхнею, а вимірне значення температури використовується при обчисленні результатів вимірювання, що підвищує точність визначення ступеню чорноти.

Схема приладу для вимірювання ступеню чорноти матеріалів зображена на рис. 1.

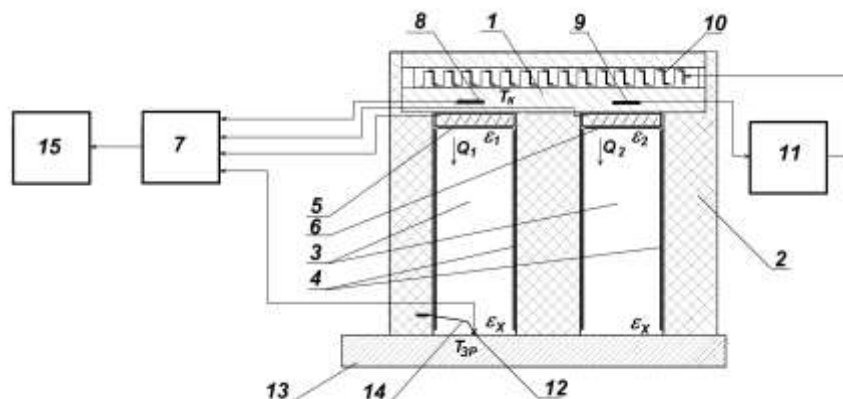


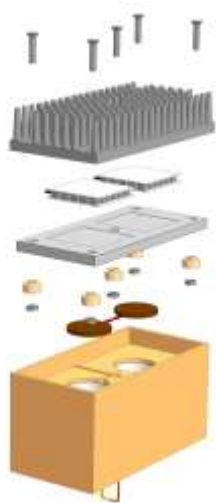
Рис.1. Схема переносного приладу для вимірювання ступеню чорноти матеріалів.

Прилад містить тепловий колектор 1 з системою задавання температури, корпус з теплоізоляційного матеріалу 2 з двома світловодними каналами 3 з відбивним покриттям бокових стінок 4, перетворювачі теплового потоку 5 і 6 у торцях каналів, що прилягають до теплового колектора і вимірювальний пристрій 7.

У тепловому колекторі 1 розташовані два перетворювачі температури 8 та 9. З поверхнею колектора контактує батарея елементів Пельт'є 10, яка разом з регулятором температури 11 і перетворювачем температури 9 утворює систему регулювання температури колектора. Перетворювач температури досліджуваної поверхні 12, розташований у зоні опромінення одного з каналів, прилягає до поверхні зразка 13 і має пруж-

ний притискач 14. Перетворювачі теплового потоку 5 і 6 мають покриття поверхонь з різними значеннями ступеню чорноти ϵ_1 та ϵ_2 . Перетворювач температури колектора 8, перетворювач температури досліджуваної поверхні 12 та перетворювачі теплового потоку 5 і 6 підключені до вимірювального пристрою, який з'єднаний з пристроєм обчислення 15. За допомогою вимірювального пристрою 7 вимірюють значення температури теплового колектора T_c , поверхні зразка T_s , та теплових потоків у каналах Q_1 та Q_2 . Теплові потоки у каналах мають дві складові - радіаційну та конвективно-кондуктивну.

Збиральне креслення та переріз теплового блоку показані на рис. 2а і 2б.



а



б

Рис. 2. Збиральне креслення (а) та переріз теплового блоку у зібраному вигляді.

Радіаційна складова пропорційна різниці четвертих ступенів температур поверхонь у торцях каналів. Конвективно-кондуктивна складова пропорційна різниці цих температур. Оскільки перетворювачі теплового потоку 5 і 6 мають різні ступені чорноти ε_1 та ε_2 , то для теплових потоків у каналах слухними є наступні співвідношення:

$$Q_1 = \phi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_C^4 - T_S^4) + K \cdot (T_C - T_S), \quad (1)$$

$$Q_2 = \phi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_C^4 - T_S^4) + K \cdot (T_C - T_S), \quad (2)$$

де: Q_1, Q_2 - значення теплових потоків, що виміряні перетворювачами теплового потоку 5 та 6;

K - коефіцієнт конвективно-кондуктивного теплообміну;

T_C, T_S - значення температури колектора та зразка;

ε_x - ступінь чорноти досліджуваного зразка;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - ступені чорноти поверхонь перетворювачів теплового потоку;

σ - стала Стефана - Больцмана;

ϕ - ефективний кутовий коефіцієнт радіаційного теплообміну в каналах, який враховує як пряме опромінення торцевих елементів каналів, так і відбиття від бокових дзеркальних стінок.

З наведеної системи рівнянь (1) та (2) випливає співвідношення:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_1 - Q_2}{\phi \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (T_C^4 - T_S^4)} = \frac{\Psi \cdot (Q_1 - Q_2)}{T_C^4 - T_S^4}, \quad (3)$$

де $\Psi = [\phi \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^{-1}$ - коефіцієнт, який залежить лише від сталої Стефана - Больцмана та параметрів конструкції приладу і може бути визначений при калібруванні приладу.

Вимірювальний пристрій 7 передає інформацію про виміряні значення температур і теплового потоку у пристрій обчислення 15, який розраховує ступінь чорноти досліджуваного зразка за формулою (3).

Перевагами запропонованого приладу є застосування диференціальної схеми та наявність засобів контролю температурного режиму теплового колектора та досліджуваного зразка, а також можливість підтримання температури колектора нижчою за температуру зразка. Це забезпечує підвищення точності вимірювань та можливість їх автоматизації, розширює температурний діапазон експлуатації та забезпечує можливість проведення вимірювань за різних варіантів взаємного розташування приладу та досліджуваного зразка. В той же час, розрахункова формула (3) є спрощеною, оскільки отримана без врахування особливостей спряженого конвективно-радіаційного теп-

лообміну у замкненому просторі з кінцевими розмірами та у припущенні про однакові значення температури сенсорів та зразка у двох комірках. Для врахування цих факторів і аналізу їх впливу проведено комп'ютерне моделювання спряженого теплообміну у комірці з обмеженими розмірами, з врахуванням зміни температури зразка під дією нагріву від комірки та різною просторовою орієнтацією комірок.

Об'єкт моделювання представляє собою замкнену циліндричну порожнину, яка відповідає комірці приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів. Порожнина заповнена атмосферним повітрям. Радіус циліндра складає $r = 10$ мм, висота $H = 30$ мм. Одна з торцевих поверхонь (сенсор) нагрівалася, а інша (зразок) сприймала теплоту (за рахунок радіаційного, кондуктивного та конвективного теплопередавання).

Для проведення дослідження побудовано комп'ютерну модель об'єкту дослідження, яку представлено на рисунку 6. Модель складалася з однієї рідинної та двох твердих розрахункових областей. Рідинна розрахункова область, що відповідає заповненій повітрям порожнині комірки, мала циліндричну форму з розмірами діаметр 20 мм висота 30 мм. З одного боку знаходиться тверда підобласть діаметр 20 мм висота 2 мм, що була моделлю сенсора, з іншого боку розташована тверда підобласть діаметром 120 мм та висотою 30 мм, що виконувала роль дослідного зразка, який виконаний з дюралю. Ці три підобласті були з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті рідина-тверде тіло.

Розрахунки проводились за допомогою програмного комплексу *ANSYS CFX*. Геометрію досліджуваного об'єкту було побудовано за допомогою підпрограми *ANSYS Design Manager*.

На зовнішній поверхні сенсора задавалася стала температура у 30°C , а на зовнішній поверхні зразка задавалася стала температура у 20°C . Інші поверхні в розрахунках приймалися адіабатними.

Досліджені варіанти комірки приладу наведено рис.3. Варіант 1 характеризувався ступенем чорноти поверхні сенсора $\varepsilon_1 = 0,95$ (позначались «dark»). Варіант 2 характеризувався ступенем чорноти поверхні сенсора $\varepsilon_1 = 0,1$ (позначались «light»). Координата площини сенсора дорівнювала $Z = 0,03$ м. В розрахунках змінювався ступінь чорноти зразка ε_2 - в діапазоні від 0,05 до 1,0. Варіанти 1 і 2 відповідають нагріву зверху, напрямку сили тяжіння протилежний напрямку осі Z (g-). Варіанти 3 і 4 відповідають нагріву знизу, напрямку сили тяжіння співпадає з напрямком осі Z (g+). Варіанти 5 і 6 відповідають горизонтальному розташуванню комірок, напрямку сили тяжіння перпендикулярний до напрямку осі Z (horizon).

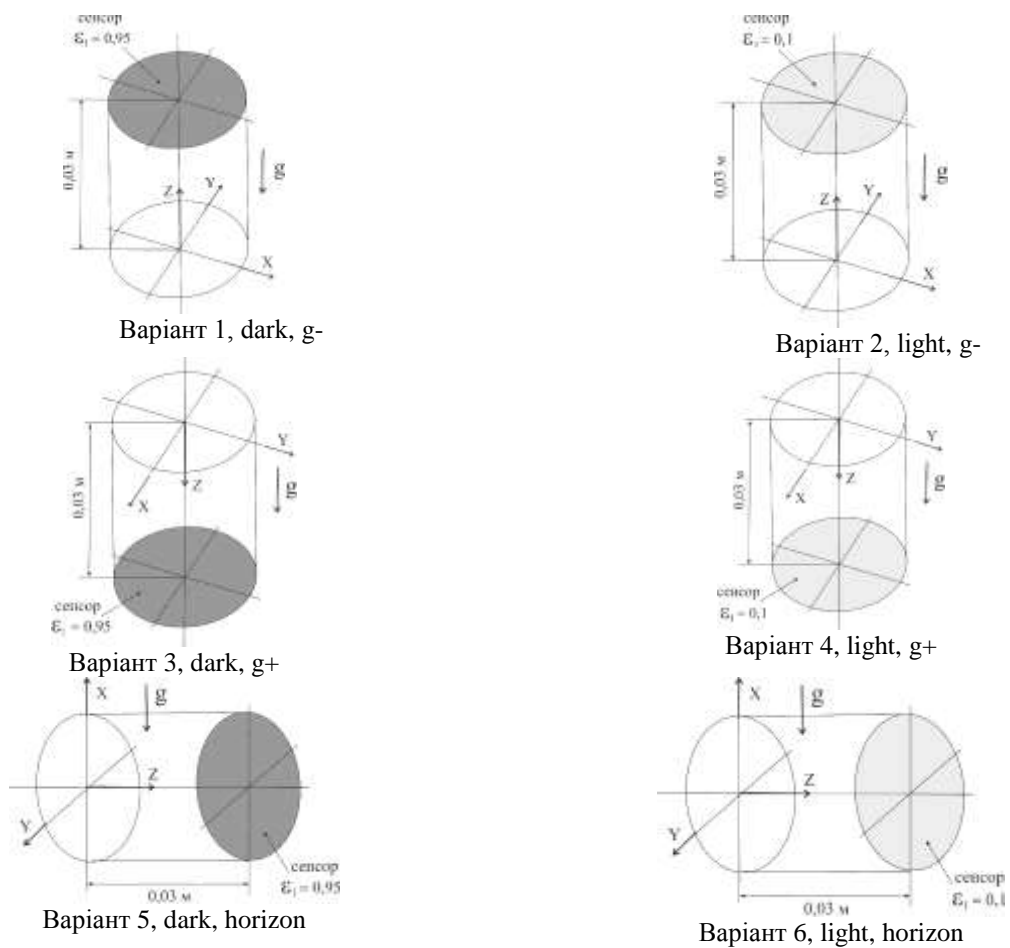


Рис. 3. Досліджені варіанти просторового розташування комірок приладу

На рис. 4 наведено векторні поля швидкості у центральних поздовжніх перерізах циліндрів у площині «YZ».

Для випадку верхнього підведення теплоти утворюються дві тороподібні вихрові пари, причому їх розміри змінюються при зміні ступеню чорноти

зразка. Вплив ступеня чорноти на гідродинаміку можна пояснити тим, що у властивості повітря включено коефіцієнт поглинання випромінювання, який дорівнює 0,01, а також різним прогрівом зразка в залежності від ступенів чорноти.

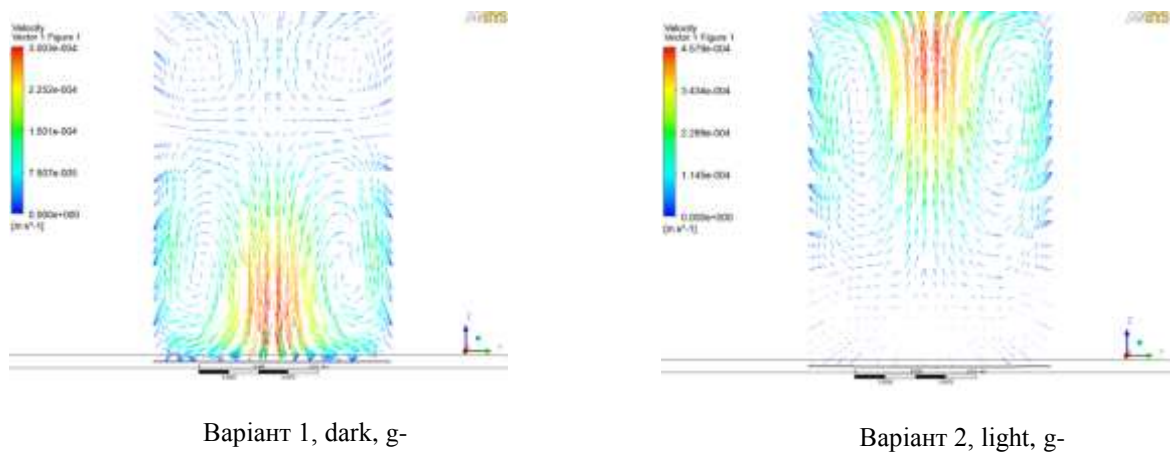


Рис. 4. Векторні поля швидкості у площині «YZ» для вертикального положення циліндру і нагріванні зверху, при значенні ступеня чорноти зразка $\epsilon_2 = 0,6$

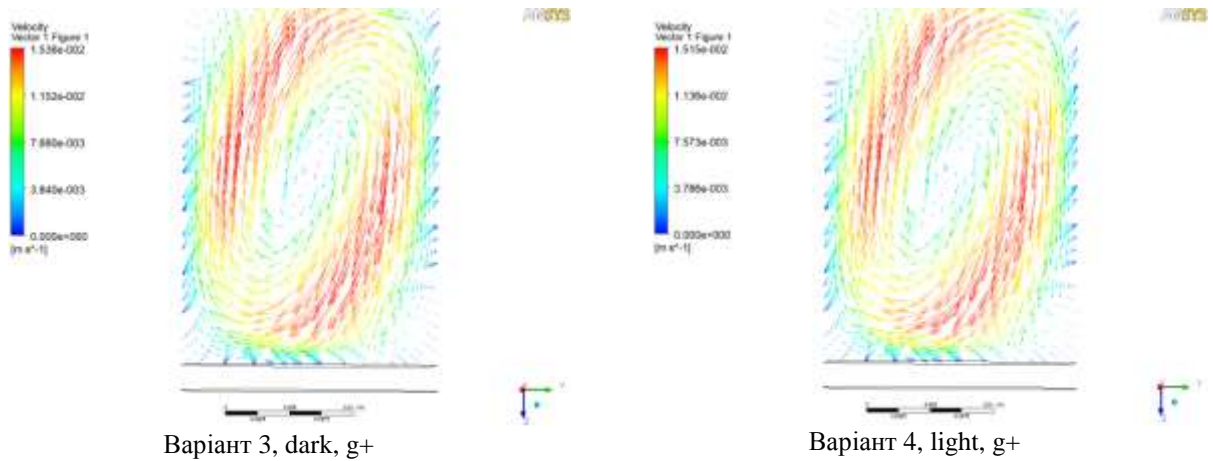


Рис.5. Векторні поля швидкості у площині «YZ» для вертикального положення циліндру і нагріванні знизу, при значенні ступеня чорноти зразка $\varepsilon_2 = 0,6$

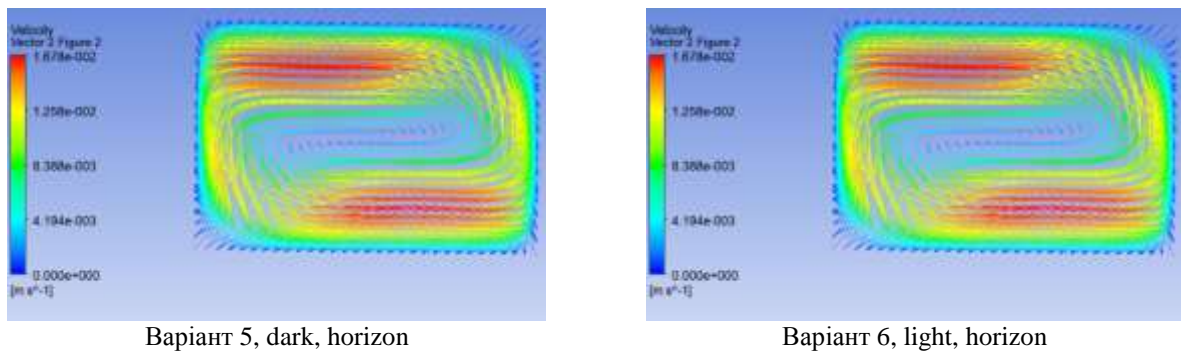


Рис.6. Векторні поля швидкості у вертикальній площині «XZ» для горизонтального положення циліндру при значенні ступеня чорноти зразка $\varepsilon = 0,6$.

На рис. 5 та рис.6 показані векторні поля швидкості варіантів розташування комірок 3 і 4 та 5 і 6, відповідно.

В розрахунках визначались три інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора: загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний: $Q_{\Sigma} = Q_C + Q_R$. При значенні ступеня чорноти сенсора $\varepsilon_1 = 0,95$ радіаційний теплообмін перевищує конвективний. При значенні ступеня чорноти сенсора $\varepsilon_1 = 0,10$ радіаційний теплообмін значно менший за конвективний.

За результатами моделювання проведено аналіз залежності вимірюваного значення ступеню чорноти від диференціального теплового потоку, визначеного як різниця потоків, виміряних у комірках з сенсорами, що мають чорне та світле покриття: $\varepsilon_x = F(Q_1 - Q_2) = F(\Delta Q)$. Отримана залежність представлена на рис. 7. Просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань і отримані залежності співпадають у масштабі наведеного графіку – їх різниця не перевершує 0,01.

Залежність вимірюваного значення ступеню чорноти від диференціального теплового потоку є калібрувальною характеристикою приладу. Ця залежність відрізняється від лінійної не більше ніж на 3%, але на відміну від (3), не проходить через центр координат, а має зміщення по осі ординат. Така відмінність зумовлена особливостями спряженого конвективно-радіаційного теплообміну у замкненому просторі з кінцевими розмірами [9, 10].

Таким чином, комп'ютерне моделювання спряженого теплообміну в комірках приладу дозволило виявити особливості такого теплообміну у замкненому просторі з кінцевими розмірами та їх вплив на калібрувальну характеристику приладу. Завдяки диференціальній схемі приладу, просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань. Виявлені нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, яка надходить від первинних сенсорів приладу. Розроблена методика калібрування приладу з використанням зразків, коефіцієнт емісії яких попередньо визначений за допомогою стаціонарної лабораторної установки [6, 7].

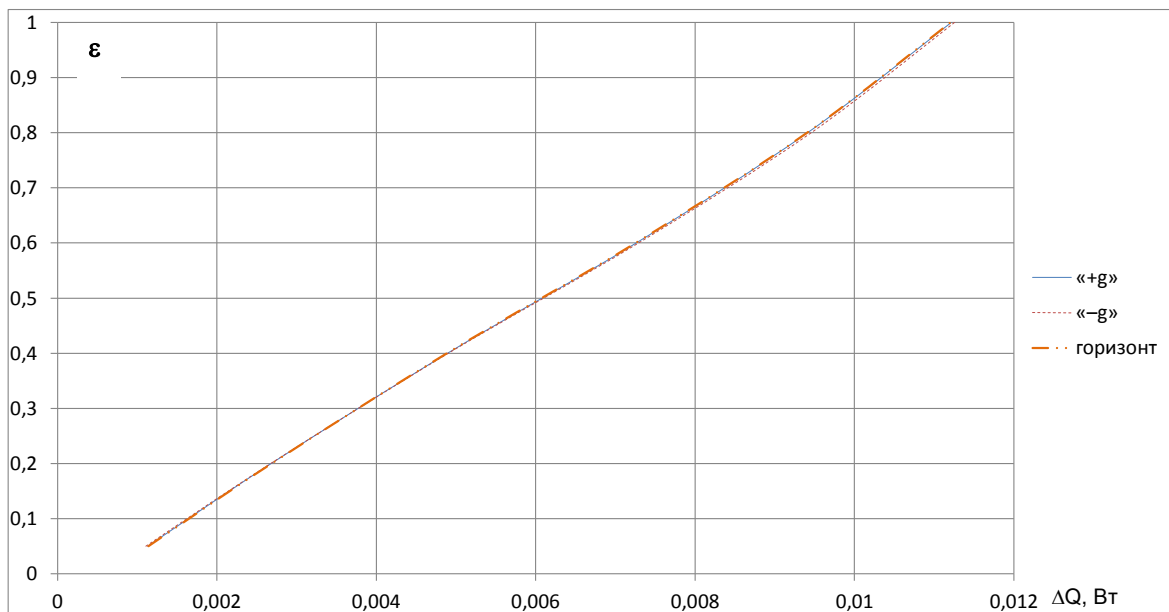


Рис.7. Залежність вимірюваного значення ступеню чорноти від диференціального теплового потоку

Висновки. Запропоновано новий метод вимірювання коефіцієнту емісії, який є комбінацією відносного радіаційного та калориметричного методів і дозволяє компенсувати вплив конвективної складової теплообміну у вимірювальній комірці. Подана відповідна заявка на патент України.

Проведено комп'ютерне моделювання та верифікацію процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в циліндричних робочих комірках переносного приладу для вимірювання коефіцієнту емісії. Встановлено, що конвектив-

ний теплообмін в комірці є співрозмірним з радіаційним теплообміном, причому конвективний теплообмін призводить до нерівномірного розподілу теплового потоку на поверхні сенсора.

Комп'ютерне моделювання встановило нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики, які необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, що надходить від первинних сенсорів приладу. В той же час, завдяки диференціальній схемі приладу, просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань.

Abstract.

The urgency of creating a portable device for express-control of the emission coefficient (emissivity) of surfaces of materials and coatings is shown. The principle of operation and design of a differential device for measuring the emission coefficient are considered. The sensitive elements of the device are thermoelectric reclaims of heat flow and temperature. Computer simulation of complex radiation processes and convective-conductive heat transfer in cylindrical working cells of a portable device has been carried out. It was found that due to the differential scheme of the device, the spatial orientation of the cells practically does not affect the measurement results. The values of nonlinearity and the shift of the calibration characteristic due to convective heat transfer are estimated, which must be taken into account in the algorithm for processing information from the primary sensors of the device.

Keywords: radiative heat exchange, emissivity measurement, heat flux sensors.

Аннотация.

Показана актуальность создания переносного прибора для экспресс-контроля коэффициента эмиссии (степени черноты) поверхностей материалов и покрытий. Рассмотрены принцип действия и конструкцию дифференциального прибора для измерения коэффициента эмиссии. Чувствительными элементами прибора являются термоэлектрические преобразователи теплового потока и температуры. Проведено компьютерное моделирование процессов сложного радиационного и конвективно-кондуктивного теплообмена в цилиндрических рабочих ячейках переносного прибора. Установлено, что благодаря дифференциальной схеме прибора, пространственная ориентация ячеек практически не влияет на результаты измерений. Оценены значения нелинейности и смещение калибровочной характеристики вследствие конвективного теплообмена, которые необходимо учитывать в алгоритме обработки информации, поступающей от первичных датчиков прибора.

Ключевые слова: радиационный теплообмен; измерения коэффициента эмиссии; сенсоры теплового потока.

Список літератури

1. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
2. Zhang, L., & Chen, R. TiO₂-Siloxane Thermal Control Coatings for Protection of Spacecraft Polymers. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2004. vol. 17, Iss. 1, pp. 53-59. doi:10.1016/S1000-9361(11)60203-3
3. Finckenor, M., & Dooling, D. NASA/TP-1999-209263. Multilayer Insulation. Material Guidelines. Alabama: *Marshall Space Flight Center*, 1999.
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990047691.pdf>
4. Freeland, R., Bilyeu G., & Veal G. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment. *Acta Astronautica*, 1996. vol. 38. Iss. 4 - 8. pp. 251-260. — [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00030-6](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00030-6).
5. Králík, T., Musilová, V., Hanzelka, P., & Frolec, J. Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures. *Metrologia*, 2016. vol.53, pp. 743–753. doi:10.1088/0026-1394/53/2/743
6. Бабак В., Воробйов Л., Декуша Л., Волков В., Бурова З., Декуша О., Ковтун, С. Вимірювання терморадіаційних характеристик спектрально-селективних матеріалів для космічних конструкцій. *Path of Science*, 2018. vol. 4, № 6, pp. 1009 – 1019. DOI: 10.22178/pos.35-2.
7. Dekusha, O., Babak, V., Vorobiov, L., Dekusha, L., Kobzar, S. & Ivanov, S. The heat exchange simulation in the device for measuring the emissivity of coatings and material surfaces. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology "ELNANO-2019"*. pp.301-304. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537.
8. Babak V. & Kovtun, S. Calibration of thermoelectrical heat flux sensors in systems for diagnosing the thermal state of electric machines. *Technical Electrodynamics*, 2019. № 1, pp.89–92. DOI: 10.15407/techmed 2019.01.089
9. Исаченко В., Осипова В., Сукомел А. Теплообмен. Учебник для вузов, 3-е изд., 1975. 488 с.
10. Dekusha, O., Vorobiov, L., Dekusha, L., Babak, V., Ivanov, S., Kobzar, S. & Kovtun, S., "Heat Exchange Simulation Of The Method And Portable Device For Measuring The Emissivity," *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 450-455, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088837.
- total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
2. Zhang, L., & Chen, R. TiO₂-Siloxane Thermal Control Coatings for Protection of Spacecraft Polymers. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2004. vol. 17, Iss. 1, pp. 53-59. doi:10.1016/S1000-9361(11)60203-3
3. Finckenor, M., & Dooling, D. NASA/TP-1999-209263. Multilayer Insulation. Material Guidelines. Alabama: *Marshall Space Flight Center*, 1999.
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990047691.pdf>
4. Freeland, R., Bilyeu G., & Veal G. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment. *Acta Astronautica*, 1996. vol. 38. Iss. 4 – 8. pp. 251-260. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00030-6](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00030-6).
5. Králík, T., Musilová, V., Hanzelka, P., & Frolec, J. Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures. *Metrologia*, 2016. vol.53, pp. 743–753. doi:10.1088/0026-1394/53/2/743
6. Babak, V., Vorobiov, L., Dekusha, L., Volkov, V., Burova, Z., Dekusha, O., & Kovtun, S. Vymiryuvannya termoradiatsiynykh kharakterystyk spektral'no-selektyvnykh materialiv dlya kosmichnykh konstruktсий. [Measurement of Thermo-Radiation Characteristics of Spectral-Selective Materials for Space Structures Designs]. *Path of Science*, 2018. vol. 4, № 6, pp. 1009 – 1019. (in Ukrainian). DOI: 10.22178/pos.35-2.
7. Dekusha, O., Babak, V., Vorobiov, L., Dekusha, L., Kobzar, S. & Ivanov, S. The heat exchange simulation in the device for measuring the emissivity of coatings and material surfaces. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology "ELNANO-2019"*. pp.301-304. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537.
8. Babak V. & Kovtun, S. Calibration of thermoelectrical heat flux sensors in systems for diagnosing the thermal state of electric machines. *Technical Electrodynamics*, 2019. № 1, pp.89–92. DOI: 10.15407/techmed 2019.01.089
9. Isachenko, V., Osypova, V., & Sukomel, A. Теплообмен. Учебник для вузов, 3-е изд. [Heat transfer. Textbook for universities, 3-d ed.], 1975. 488 p. (in Russian).
10. Dekusha, O., Vorobiov, L., Dekusha, L., Babak, V., Ivanov, S., Kobzar, S. & Kovtun, S., "Heat Exchange Simulation Of The Method And Portable Device For Measuring The Emissivity," *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 450-455, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088837.

References

1. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance,