

УДК 536.24

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЦІЙНО-КОНВЕКТИВНОЇ ТЕПЛОВІДДАЧІ ВІД НАГРІТОГО ОБ'ЄКТУ В НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

Басок Б.І.¹, чл.-кор. НАН України, Давиденко Б.В.², д.т.н., Шматок О.І.³, к.т.н., Демченко В.Г.⁴, к.т.н.

¹д.т.н., проф., зав. відділу (ORCID: 0000-0002-8935-4248)

²д.т.н., гол. наук. співр. (ORCID: 0000-0001-8738-7612),

³пров. наук. співр. (ORCID: 0009-0009-2133-2411),

⁴ст. наук. співр., зав. лаб. (ORCID: 0000-0002-4211-356X).

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2026.2>

Наведено результати чисельного дослідження радіаційно-конвекційного теплообміну між нагрітою горизонтальною алюмінієвою пластинкою і повітряним середовищем при наявності плоского текстолітового екрану, встановленого паралельно нагрітій пластині на деякій відстані від неї. Для зменшення інтенсивності радіаційного теплового потоку з зовнішньої поверхні текстолітового екрану на його поверхнях нанесено низькоемісійне покриття з мідної фольги. За результатами чисельних досліджень визначається вплив низькоемісійне покриття і відстані між екраном і нагрітою пластинкою на зменшення інтенсивності радіаційного теплового потоку з поверхні екрану. Ці результати можуть використовуватися для визначення способу ефективного температурного масування нагрітих елементів обладнання.

The results of a numerical study of radiative-convective heat transfer between a heated horizontal aluminum plate and the air environment are presented. A flat textolite screen is installed parallel to the heated plate at a distance from it. To reduce the intensity of radiative heat flux from the outer surface of the textolite screen, a low-emission copper foil coating is applied to its surfaces. The numerical results determine the effect of the low-emission coating and the distance between the screen and the heated plate on reducing the intensity of radiative heat flux from the screen's surface. These results can be used to develop a method for effective thermal masking of heated equipment components.

Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: радіаційний тепловий потік, вільна конвекція, низькоемісійне покриття, текстолітовий екран, температурне маскування, чисельне моделювання.

B – ширина розрахункової області;

C_p – питома теплоємність;

g – прискорення сили тяжіння;

H – висота розрахункової області;

n – зовнішня нормаль;

p – тиск;

q – густина теплового потоку;

r – радіус вектор;

R – газова стала;

T – температура;

u_y – горизонтальна швидкість;

u_z – вертикальна швидкість;

x, y – горизонтальні координати, паралельні до площини пластини;

z – вертикальна координата, перпендикулярна до площини пластини;

δ – товщина

ε – степінь чорноти

λ – коефіцієнт теплопровідності;

μ_n – динамічний коефіцієнт в'язкості газу;

ρ – густина;

τ – час;

Нижні індекси:

ал – алюміній;

з – зовнішній;

р – радіаційний;

п – повітря;

с – стінка;

т – текстоліт;

в – внутрішній;

n – нормаль;

max – максимальний;

min – мінімальний.

Вступ. Щоб замаскувати об'єкти, які мають температуру вище температури навколишнього середовища, застосовують покриття з низькою випромінювальною здатністю. Для розпізнавання таких об'єктів в умовах

темряви застосовуються технічні пристрої, що фіксують інфрачервоне випромінювання з нагрітих поверхонь цих об'єктів. Для їх ефективного теплового маскування необхідно застосовувати такі покриття, які б змен-

шували інтенсивність інфрачервоного випромінювання від нагрітих об'єктів та ускладнювали розповсюдження цього випромінювання в довкіллі. Такі покриття повинні мати як належні теплоізоляційні властивості для зменшення надходження теплоти від нагрітого об'єкту до зовнішньої поверхні покриття, так і низькі значення коефіцієнтів випромінювання поверхонь покриттів. Це особливо важливо в умовах бойових дій для маскуванню в нічний період доби особового складу і військової техніки. Потужність та довжина хвилі випромінювання залежать від температури випромінюючого матеріалу. Довжина хвиль інфрачервоного спектру більша, ніж видимого випромінювання. Тому людське око не бачить інфрачервоне випромінювання. Здатність тіл випромінювати визначається не тільки їх температурою, але і станом їх поверхонь [1].

Необхідність фіксувати інфрачервоне випромінювання призвело до інтенсивного розвитку обладнання для розпізнавання тих чи інших об'єктів і умов темряви. До таких приладів належать тепловізори, прилади нічного бачення та пірометри. Особливо широке застосування ці прилади знайшли у військовій сфері. Це, зокрема, прилади нічного бачення та тепловізори. Тепловізори здатні вловлювати теплове випромінювання за несприятливих кліматичних умов. При цьому температурне спостереження можна вести без додаткового джерела світла. Воно також не потребує інфрачервоного підсвічування.

Процес формування зображення в оптико-електронних приладах залежить від багатьох факторів [2]. Аналіз цих факторів дозволяє з'ясувати параметри, які можуть перешкоджати оптико-електронним приладам (зокрема тепловізорам) отримувати якісні зображення у інфрачервоному діапазоні випромінювання. До таких параметрів можна, крім температури об'єктів, віднести також відбивну та випромінювальну здатність їх поверхонь, наявність камуфляжу, тощо. Отже інтенсивність інфрачервоного випромінювання можна регулювати шляхом зниження температури поверхні об'єктів та коефіцієнтів випромінювання. На цих засадах і розробляються різноманітні покриття та спеціальні технології, які забезпечують скритність військових об'єктів від виявлення за допомогою оптико-електронних приладів.

В [3] наведено аналіз існуючих технологій скритності на основі використання спеціальних матеріалів та методів, які знижують оптичні та інфрачервоні випромінювання з поверхонь об'єктів, одночасно змішуючи їх з навколишнім середовищем. Видимі покриття об'єктів на основі лакофарбових

виробів, які збільшують відбивну властивість поверхні, і, відповідно, зменшують випромінювальну здатність, являють собою найпростіші заходи маскуванню. Ключовими інгредієнтами таких покриттів є пігменти та речовина, що їх сполучає. Речовини, що сполучають пігменти, утримують разом їх частинки після висихання фарби. Одним із найпоширеніших пігментів загально-го використання є діоксид титану [4], а більшість сполучних речовин виготовляються з олій або полімерів. Крім діоксид титану до складу видимих покриттів можуть входити як пігменти з низьким коефіцієнтом випромінювання в інфрачервоному діапазоні хвиль, так і інші металеві порошки, включаючи графен, алюміній, цинк, мідь та нікель [5]. Використання таких пігментів завдяки їх високій відбивній здатності призводить до помірного поглинання та низького коефіцієнта випромінювання поверхні об'єктів. Основними оптичними властивостями пігментів є їхній показник заломлення та непрозорість. Пігмент контролює відбивну здатність, забезпечуючи високий показник заломлення відносно середовища для сполучення.

Більшість фарб, що застосовуються для приховування інфрачервоного випромінювання, є композиціями, до складу яких входить кілька типів матеріалів [3, 5]. Наприклад, включення графену разом з частинками алюмінію в покриттях на основі епоксидної смоли забезпечує низький рівень випромінювання та антикорозійні властивості. Але сама епоксидна смола має високий коефіцієнт випромінювання в інфрачервоному діапазоні, що небажано з точки зору приховування випромінювання. Додавання наповнювача у вигляді графенових нанолістів значно знижує коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкту в інфрачервоному діапазоні. Звичайно ідеальні покриття відповідають вимогам приховування як видимого, так і інфрачервоного випромінювання, а також приховування радіочастотного випромінювання [3].

Традиційні методи контролю відбивної здатності поверхні в інфрачервоному діапазоні зазвичай зосереджувалися на використанні металів. За допомогою металевих поверхонь можна досягти помірної або високої відбивної здатності в інфрачервоному діапазоні. Але ця можливість залежить від стану поверхні і рівня її окислення, а також від шорсткості поверхні. Тому в ряді випадків може знадобитися додаткове прозоре покриття поверхневе. В роботі [6] наведені значення випромінювальної здатності деяких металів, зокрема випромінювальна здатність алюмінію, в залежності від шорсткості і ступеня окислення поверхні.

Крім металевих покриттів при створенні інфрачервоних камуфляжів можна використовувати матеріали з фазовим переходом. Завдяки властивостям матеріалів з фазовим переходом можна контролювати інтенсивність інфрачервоного випромінювання об'єкта, який треба захистити, регулюючи його температуру. Матеріали з фазовим переходом здебільшого існують в спеціальних тканинах у формі мікрокапсул. В роботах [7, 8] наведена технологія за допомогою якої поліетиленгліколь був зв'язаний з лауратом целюлози для отримання розчину відповідного щепленого полімеру. А потім волокно з фазовим переходом виготовлялося методом електропрядіння. Також в [7] відмічається значна роль органічних зв'язуючих при створенні інфрачервоного камуфляжу.

Слід зазначити, що наведені вище технології по створенню покриття забезпечують фіксовані властивості покриттів, такі як колір, відбивна здатність та випромінювальна здатність. Як зазначається в [3], ідеальні камуфляжні покриття повинні мати можливість адаптації їх відбивної здатності до фону перебування об'єктів. Ця вимога зумовлена можливістю руху об'єкту, умовами експлуатації, добовими змінами параметрів навколишнього середовища. На сьогоднішній день відомі так звані адаптивні матеріали, оптичні властивості яких змінюються під впливом зовнішніх умов. Такі матеріали називаються хромогенними. Хромогенним матеріалам та методам їх використання присвячені монографії [9].

До об'єктів, які мають елементи з високою температурою, можна віднести будь яку військову техніку з тим чи іншим двигуном, що працює на вуглеводному паливі, в тому числі будь які летальні апарати, кораблі, підводні човни тощо. В [10] запропоновані шляхи зниження інфрачервоної помітності летальних апаратів, які можна поширити і на іншу техніку з двигунами.

Отже, дієвий спосіб зниження інфрачервоної помітності об'єктів, що мають температуру вище температури довкілля, полягає в закритті або екрануванні прямої видимості їх найбільш нагрітих частин. Але виникає питання, яка саме випромінювальна здатність зовнішньої поверхні екрану забезпечить задовільне температурне маскування.

Мета цього дослідження полягає у визначенні впливу покриття з металевої фольги на поверхні текстолітового екрану, а також відстані від екрану до нагрітого об'єкту, на зниження інтенсивності радіаційного теплового потоку з поверхні екрану, що може забезпечити задовільне

температурне маскування нагрітого об'єкту та ускладнити його розповсюдження на фоні довкілля. Для досягнення цієї мети застосовується чисельне моделювання радіаційно-конвекційного перенесення теплоти від нагрітого об'єкту в довкілля при наявності біля цього об'єкту на певній відстані від нього текстолітового екрану з низькоємісійним покриттям на його поверхнях.

Постановка задачі чисельного моделювання. Розглядається горизонтальна алюмінієва пластина товщиною $\delta_{ал}$, температура якої $T_{ал}$. Ця температура рівномірно розподілена по об'єму цієї пластини. На певній відстані $\delta_{п}$ від алюмінієвої пластини паралельно їй розташована текстолітова пластина товщиною $\delta_{т}$, що виконує функцію маскувального екрану над алюмінієвою пластиною. На зовнішній і внутрішній поверхнях текстолітової пластини нанесено покриття з мідної фольги. Методом чисельного моделювання досліджується вільноконвекційна течія повітря над алюмінієвою пластиною та текстолітовим екраном та перенесення теплоти від нагрітої алюмінієвої пластини до повітряного середовища і текстолітового екрану, а також перенесення теплоти від текстолітового екрану в довкілля. Визначається вплив покриття з мідної фольги і відстані $\delta_{п}$ між пластиною і екраном на інтенсивність радіаційного теплового потоку з зовнішньої поверхні екрану, який може бути зафіксованим оптико-електронним приладом.

Задача гідродинаміки і перенесення теплоти розглядається у двовимірній постановці і описується системою рівнянь, що якої входять:

- рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho_{п}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_{п} u_z)}{\partial z} + \frac{\partial (\rho_{п} u_y)}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж горизонтальної осі 0Y:

$$\frac{\partial (\rho_{п} u_y)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_{п} u_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho_{п} u_y u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{п} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu_{п} \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2\mu_{п}}{3} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right]; \quad (2)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж вертикальної осі 0Z:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{п}}u_z)}{\partial\tau} + \frac{\partial(\rho_{\text{п}}u_zu_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_{\text{п}}u_z^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{\text{п}} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu_{\text{п}} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - \frac{2\mu_{\text{п}}}{3} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \rho_{\text{п}}g; \quad (3)$$

- рівняння енергії для газового середовища:

$$\frac{\partial(C_{\text{п}}\rho_{\text{п}}T)}{\partial\tau} + \frac{\partial(C_{\text{п}}\rho_{\text{п}}u_zT)}{\partial z} + \frac{\partial(C_{\text{п}}\rho_{\text{п}}u_yT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Для визначення густини газового середовища застосовується рівняння стану ідеального газу.

$$p = \rho_r R_r T \quad (5)$$

Перенесення теплоти в текстолітовій пластині описується рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial(C_{\text{т}}\rho_{\text{т}}T)}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{т}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{т}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Теплофізичні властивості текстоліту вважаються постійними, а теплопровідність і в'язкість газового середовища залежать від температури за лінійним законом.

Для рівнянь (1) - (6) на границях розрахункової області $0 < z < H$; $0 < y < B$ формулюються наступні граничні умови.

$$y = 0; y = B: 0 < z < z_{\text{min}}: u_y = 0; \frac{\partial u_z}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$z = 0: u_y = 0; p = p_0; T = T_{\text{п}}; \quad (8)$$

$$z = H: u_y = 0; p = p_0 - \rho_{\text{п},\infty} g H; \frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

де $T_{\text{п}}$ - температура зовнішнього повітря а також предметів, що знаходяться на далекій відстані від алюмінієвої пластини та екрану.

На горизонтальних поверхнях текстолітової пластини задаються граничні умови четвертого роду. На внутрішній поверхні текстолітової пластини:

$$-\lambda_{\text{п}} \frac{\partial T(z, y)}{\partial z} \Big|_{z=z_{\text{в}}-0} + q_{\text{п,в}} \Big|_{z=z_{\text{в}}-0} = -\lambda_{\text{т}} \frac{\partial T(z, y)}{\partial z} \Big|_{z=z_{\text{в}}+0} \quad (10)$$

де $q_{\text{п,в}}(y)$ – густина радіаційного теплового потоку, що надходить на внутрішню поверхню текстолітової пластини з боку нагрітої алюмінієвої пластини; $z_{\text{в}}$ - вертикальна координата точок на внутрішній поверхні текстолітової пластини;

$$q_{p,b}|_{z=z_b}(y) = \frac{c_0}{\frac{1}{\varepsilon_{ал}} + \frac{1}{\varepsilon_T} - 1} \int_{y_{min}}^{y_{max}} \left[\left(\frac{T_{ал}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c(z_b, y)}{100} \right)^4 \right] \int_{x_{min}}^{x_{max}} \frac{\cos[r(x, y'), n_1] \cos[r(x, y'), n_2]}{\pi r^2} dx dy'$$

e y - горизонтальна координата точок на внутрішній поверхні текстолітової пластини; y' - горизонтальна координата точок на зовнішній поверхні алюмінієвої пластини; y_{min} і y_{max} - горизонтальні координати початку і кінця алюмінієвої пластини в напрямку осі OY ; x_{min} і x_{max} - горизонтальні координати початку і кінця алюмінієвої пластини в напрямку осі OX ; $\varepsilon_{ал}=0,3$ - степінь чорноти поверхні алюмінієвої пластини; $\varepsilon_T=0,93$ - степінь чорноти текстолітової поверхні. При наявності на поверхні текстолітової пластини мідного покриття в наведених виразах степінь чорноти текстоліту ε_T змінюється на степінь чорноти мідної фольги $\varepsilon_M=0,08$; n_1 ; n_2 - напрямки зовнішніх нормалей до поверхонь алюмінієвої і текстолітової пластин; $r(x, y')$ - довжина відрізка прямої, що з'єднує точки на поверхнях текстолітової і алюмінієвої пластин.

На зовнішній поверхні текстолітової пластини:

$$-\lambda_T \frac{\partial T(z, y)}{\partial z} \Big|_{z=z_3-0} = -\lambda_{п} \frac{\partial T(z, y)}{\partial z} \Big|_{z=z_3+0} + q_{p,3} \Big|_{z_3+0} \quad (11)$$

$q_{p,3}(y)$ – густина радіаційного теплового потоку, що випромінюється з зовнішньої поверхні текстолітової пластини в довкілля; z_3 - вертикальна координатна зовнішньої поверхні текстолітового екрану.

$$q_{p,3} \Big|_{z=z_b}(y) = \frac{c_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} + \frac{1}{\varepsilon_T} - 1} \left[\left(\frac{T_c(z_3, y)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 \right],$$

де $\varepsilon_{\infty} = 0,7$ - умовна степінь чорноти об'єктів, що розташовуються в довкіллі.

Результати чисельних досліджень. Чисельне моделювання перенесення теплоти від нагрітої до температури $T_{ал}=80$ °С горизонтальної алюмінієвої пластини в зовнішнє повітряне середовище, температура якого $T_{п}=26$ °С, при наявності на певній відстані $\delta_{п}$ від алюмінієвої пластини текстолітового екрану виконується для випадків наявності на поверхнях екрану мідної фольги та для випадків її відсутності. З порівняння результатів чисельного моделювання для цих варіантів визначається степінь зменшення радіаційного теплового потоку з зовнішньої поверхні екрану за рахунок нанесення низькоемісійного покриття з мідної фольги. Дослідження проводяться для відстаней між алюмінієвою пластиною та екраном $\delta_{п} = 1$ мм; 3 мм і 6 мм. Товщини алюмінієвої та текстолітової пластин $\delta_{ал} = \delta_T = 10$ мм. Довжини пластин $\Delta y = y_{max} - y_{min} = 0,66$ м.

Результати розрахунку полів швидкості і температури в повітряному середовищі та в текстолітовій пластині з мідним покриттям при зазорі $\delta_{п} = 6$ мм між алюмінієвою і текстолітовою пластинами наведено на рис.1.

З цього рисунку видно, що при горизонтальному розташуванні пластин над текстолітовою пластиною утворюються дві симетричні підйомно-опускні течії. Розподіли швидкості і температури в горизонтальному напрямку над поверхнею текстолітової пластини з мідною фольгою для відстані між пластинами $\delta_{п} = 6$ мм наведено на рис. 2 а, б. Розподіл зазначених величин відповідає висоті 60 мм від зовнішньої поверхні текстолітового екрану.

З рис. 2 а видно, що максимальні значення швидкості підйомної течії в даному перерізі становить $u_z = 0,69$ м/с. При цьому температура підйомної повітряної течії на середині даного перерізу дорівнює 51 °С (рис. 2 б).

Розподіли температури по зовнішній поверхні текстолітової горизонтальної пластини без покриття і з мідним покриттям при різних відстанях $\delta_{п}$ між пластинами наведено на рис.3.

З цього рисунку видно, що максимальна температура на зовнішній поверхні текстолітової пластини зменшується зі збільшенням відстані між алюмінієвою і текстолітовою пластинами. Наявність мідного покриття сприяє підвищенню температури зовнішньої поверхні текстолітової пластини. Так при відстані між пластинами $\delta_{п} = 1$ мм максимальна температура посередині текстолітової пластини без мідного покриття дорівнює 68,28°С. При

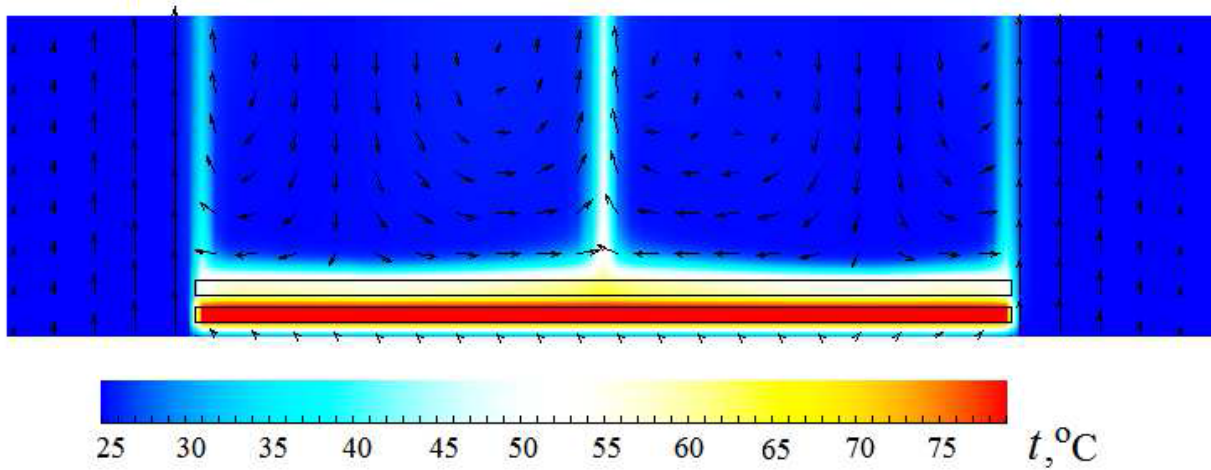


Рис. 1. Поля швидкості і температури над горизонтальною текстолітовою пластиною з мідним покриттям при зазорі 6 мм між алюмінієвою і текстолітовою пластинами

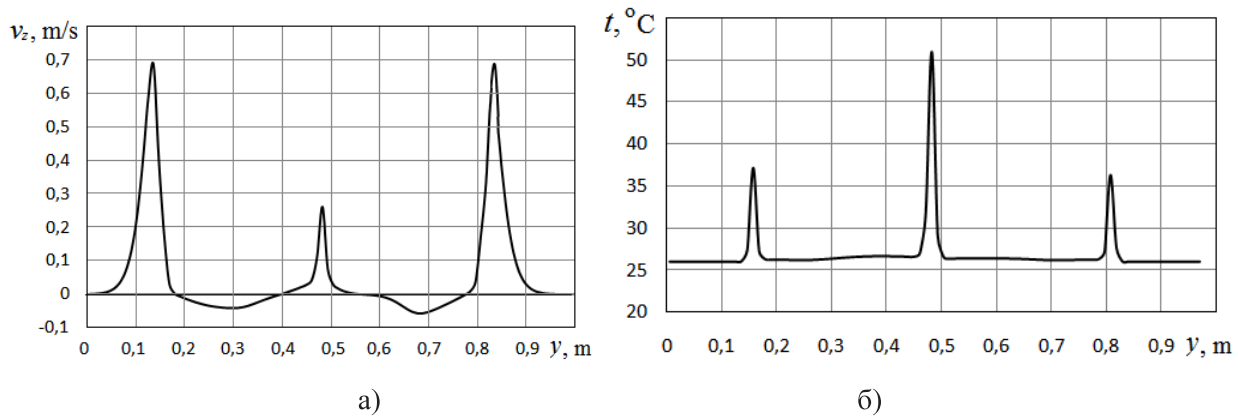


Рис. 2. Розподіли в горизонтальному напрямку у вертикальній швидкості v_z вільноконвекційної течії (а) і температури (б) на відстані 60 мм від зовнішньої поверхні горизонтальної текстолітової пластини з мідним покриттям

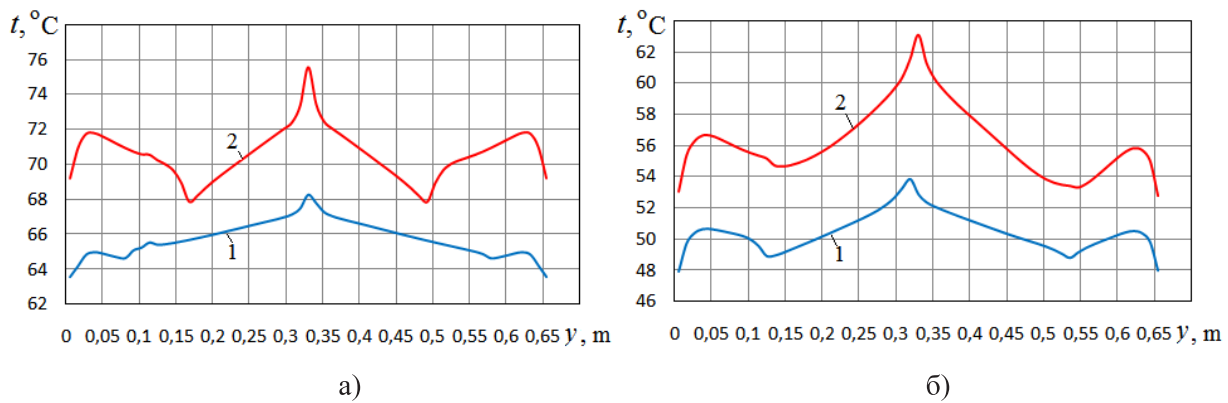


Рис. 3 Розподіл температури по зовнішній поверхні текстолітової горизонтальної пластини без покриття (1) та з мідним покриттям (2): а) - зазор 1мм; б)- зазор $\delta_n = 6$ мм

наявності мідного покриття ця максимальна температура на середині зовнішньої поверхні текстолітової пластини підвищується до 75,59 °C (на 7,3°C). Зі збільшенням

відстані δ_n між пластинами максимальна температура зовнішньої поверхні пластини зменшується. Так при $\delta_n = 6$ мм температура посередині текстолітової пластини

без мідного покриття дорівнює $53,82^{\circ}\text{C}$, а при наявності мідного покриття максимальна температура зростає до $63,07^{\circ}\text{C}$ (збільшується на $9,25^{\circ}\text{C}$).

Розподіл густин сумарних (конвекційних і радіаційних) теплових потоків по зовнішній поверхні текстолітової горизонтальної пластини без покриття та з мідним покриттям при різних значеннях відстані між алюмінієвою і текстолітовою пластинами наведено на рис. 4.

З рисунку видно, що мінімальні значення сумарної густини теплового потоку припадають на середину пластини. Далі вліво і вправо від середини пластини густини сумарних теплових потоків збільшуються. Після досягнення максимальних значень, густини теплового потоку в напрямку лівого і правого торців зменшуються. З рисунків також видно, що густина сумарного теплового потоку на поверхні текстолітової пластини з мідним покриттям менше, ніж у випадку текстолітової пластини без покриття. Зі збільшенням відстані між пластинами δ_n сумарний тепловий потік на зовнішній поверхні текстолітової пластини зменшується. Для випадку

$\delta_n=1$ мм при відсутності мідної фольги середня густина сумарного теплового потоку становить $q=275,36$ Вт/м², а при її наявності ця величина зменшується до $q=142,93$ Вт/м² (тобто, зменшується в 1,92 рази). При $\delta_n=6$ мм середня густина сумарного теплового потоку на зовнішній поверхні пластини за відсутності мідного покриття становить $172,38$ Вт/м², а при його наявності ця величина зменшується до $96,51$ Вт/м² (тобто, в 1,79 рази).

Сумарний тепловий потік зменшується переважно через зменшення його радіаційної складової. Радіаційний тепловий потік зменшується зі збільшенням відстані δ_n між нагрітою пластинною та екраном. Покриття з мідної фольги також суттєво зменшує радіаційний тепловий потік (рис. 5). При $\delta_n=1$ мм середня густина радіаційного теплового потоку на зовнішній поверхні текстолітової пластини без покриття складає $q_r=196,17$ Вт/м², а при нанесенні на зовнішню поверхню текстолітової пластини мідної фольги ця величина зменшується до $q_r=26,23$ Вт/м², тобто в 7,48 рази. При $\delta_n=6$ мм середня густина радіаційного теплового потоку на зовнішній

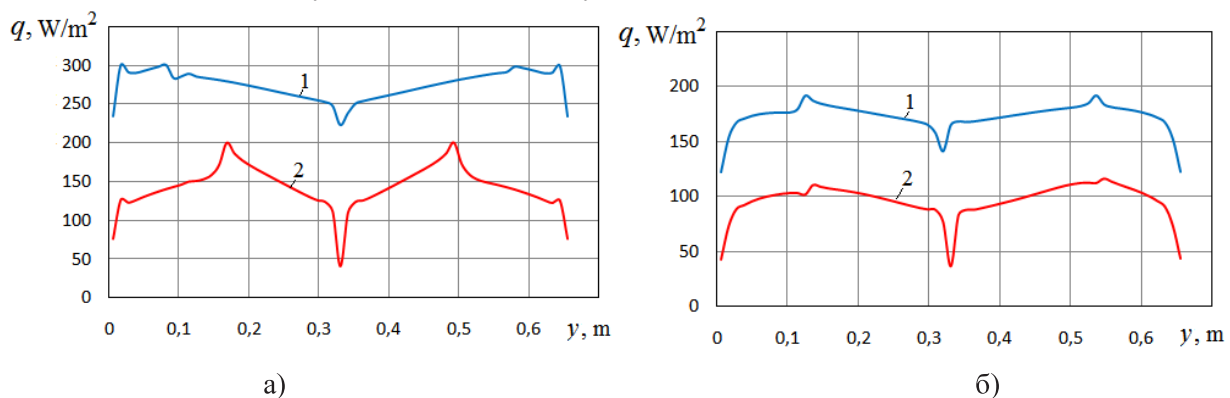


Рис. 4. Розподіл сумарних теплових потоків по зовнішній поверхні текстолітової горизонтальної пластини без покриття (1) та з мідним покриттям (2): а) - зазор $\delta_n=1$ мм; б) - $\delta_n=6$ мм.

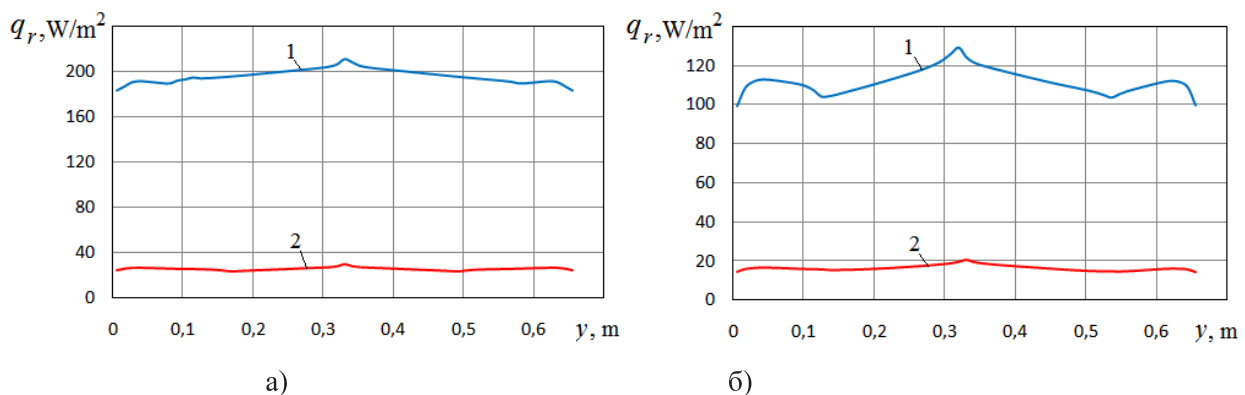


Рис. 5. Розподіл радіаційних теплових потоків по зовнішній поверхні текстолітової горизонтальної пластини без покриття (1) та з мідним покриттям (2): а) - зазор $\delta_n=1$ мм; б) - $\delta_n=6$ мм

поверхні текстолітової пластини без покриття дорівнює $q_r=111,96$ Вт/м², а у випадку наявності цього покриття вона становить лише $q_r=16,6$ Вт/м². Отже за рахунок мідного покриття середня густина радіаційного теплового потоку на зовнішній поверхні текстолітової пластини зменшується в 6,74рази. З рис. 5 видно, що розподіл густини радіаційного теплового потоку по зовнішній поверхні текстолітової пластини характеризується наявністю максимуму в середині пластини, де температура пластини найвища.

Висновки.

1. За результатами чисельного моделювання радіаційно-конвекційної тепловіддачі від нагрітої пластини в навколишнє середовище в умовах вільної конвекції визначено, що при збільшенні відстані між нагрітою алюмінієвою і текстолітовою пластинами температура зовнішньої поверхні текстолітової пластини зменшується. При збільшенні відстані між нагрітою алюмінієвою і текстолітовою пластинами зменшується середні густини радіаційного і сумарного теплових потоків на зовнішній поверхні текстолітової пластини.

2. За умов нанесення на поверхні текстолітової пластини покриття з мідної фольги зменшуються середні густини радіаційного і сумарного теплових потоків на зовнішній поверхні текстолітової пластини. При горизонтальному положенні пластин за рахунок мідного покриття середня густина радіаційного теплового потоку на зовнішній поверхні текстолітової поверхні зменшується в 6,7...7,5 рази.

3. За умов нанесення на поверхні текстолітової пластини покриття з мідної фольги температура зовнішньої поверхні текстолітової пластини збільшується внаслідок зменшення інтенсивності радіаційної тепловіддачі з її поверхні.

Підтримка. Ця робота підтримана і фінансується в рамках проекту № 2025.06/0054 «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

ЛІТЕРАТУРА

1. Бруква Н.М., Скіцько І.Ф.. Вивчення законів теплового випромінювання. Електронне мережеве навчальне видання. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023.
2. Dragana Peri'c, Branko Livada, Miroslav Peri'c and Saša Vuji. Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality. Sensors 2019, 19, 3313; doi:10.3390/s19153313. www.mdpi.com/journal/sensors
3. David H. Pollock. The Infrared & Electro- Optical Systems Handbook. Volume 7. Chapter Tree ERIM/SPIE PRESS, 1993.
4. Surface Coatings: Vol I - Raw Materials and Their Usage. Springer, ISBN-13: 978-9401169424 April 20, 2014 Soft cover reprint of the original 1st ed. 1983
5. Nidi Shirke, Vaijayanti Ghase, Vandana Jamdar. Recent advances in stealth coating. Polymer Bulletin. 1 3 review paper. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05166-4>
6. Чепурний М.М., Резидент Н.В.. Тепломасообмін в прикладах та задачах. Вінниця ВНТУ, 2021 – 128 с. https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/chepurnij_tplomasoob/6.htm
7. Xi Zhou, Binjie Xin, Yan Liu. Research progress on infrared stealth fabric. Journal of Physics: Conference Series 1790 (2021) 012058IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1790/1/012058
8. Xu Sumei, Halidan Maimati, Minawar Umer, Rutifra Wushouer. Preparation and properties of cellulose laurate/polyethylene glycol phase change energy storage fibers. Journal of Textiles, 2016, 37 (04): 7-14.
9. Granqvist C. G. Spectrally Selective Surfaces for Heating and Cooling Applications, Vol. TT01, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1989), ISBN: 9781510616547
10. Кравчук І. С., Архипов М.І., Туренко С.М., Штарнов В.І.. Захист повітряних об'єктів від ракет з інфрачервоним самонаведенням. Київ Видавничий дім «Інтернаука» 2020. — 296 с DOI: 10.25313/978-966-97817-5-8

**NUMERICAL MODELING OF
RADIATION-CONVECTION HEAT TRANSFER
FROM A HEATED OBJECT TO THE
SURROUNDING ENVIRONMENT UNDER
CONDITIONS OF FREE CONVECTION**

**Borys B.I.¹, Davydenko B.V.², Shmatok O.I.³,
Demchenko V.G.⁴**

¹*Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doc. Tech. Sci., Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-8935-4248, e-mail: borys.basok@gmail.com;*

²*Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-8738-7612, e-mail: bdavydenko@ukr.net;*

³*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0009-0009-2133-2411, e-mail: alexshok@ukr.net;*

⁴*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0009-0009-2133-2411, e-mail: DemchenkoVG@nas.gov.ua.*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.2>

A known method of protecting heated objects from being recognized by optoelectronic devices that detect infrared radiation is to use screens over the heated objects that reduce the intensity of this radiation. Low-emissivity coatings with low emissivity coefficients are applied to the surface of such screens. Such a coating can be copper foil. To determine the effectiveness of this method of temperature masking of heated objects, numerical simulation of radiation-convection heat transfer of a heated horizontal plate with the environment, above which a textolite screen with copper foil on the surface is located, is performed. Numerical modeling is performed by the method of numerical solution of the system of equations of hydrodynamics and heat transfer. This system is supplemented by boundary conditions of the fourth kind, which take into account the presence of radiation heat flux on the surfaces of the plate and the screen. It is determined that the radiation heat flux on the outer surface of the screen under the conditions considered can be reduced by 6.7...7.48 times due to the copper foil coating. In this case, increasing the distance between the screen and the heated object contributes to the reduction of the radiation heat flux from the screen.

References 10, Figures 5.

Key words: radiation heat flux, free convection, low-emissivity coating, textolite screen, temperature masking, numerical modeling.

1. *N.M. Brukva, I.F. Skits'ko.* Vyvchennya zakoniv teplovoho vprominyuvannya. Elektronne merezheve navchal'ne vydannya. [Study of the laws of thermal radiation. Electronic online educational publication.] National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 2023. (in ukr.)

2. *Dragana Peri'c, Branko Livada, Miroslav Peri'c and Saša Vuji.* Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality. *Sensors* 2019, 19, 3313; doi:10.3390/s19153313. www.mdpi.com/journal/sensors

3. *David H. Pollock.* The Infrared & Electro- Optical Systems Handbook. Volume 7 Chapter Tree ERIM/SPIE PRESS, 1993.

4. *Surface Coatings: Vol I - Raw Materials and Their Usage.* Springer, ISBN-13: 978-9401169424 April 20, 2014 Soft cover reprint of the original 1st ed. 1983

5. *Nidi Shirke, Vaijayanti Ghase, Vandana Jamdar.* Recent advances in stealth coating. *Polymer Bulletin.* 1 3 review paper. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05166-4>

6. *M.M. Chepurnyi, N.V. Resident.* Teplomasoobmin v prykladakh ta zadachakh. [Heat and mass transfer in examples and problems.] Vinnytsia VNTU, 2021 – 128 p. (in ukr.) https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/cheburnij_teplomasoob/6.htm

7. *Xi Zhou, Binjie Xin, Yan Liu.* Research progress on infrared stealth fabric. *Journal of Physics: Conference Series* 1790 (2021) 012058IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1790/1/012058

8. *Xu Sumei, Halidan Maimati, Minawar Umer, Rutifra Wushouer.* Preparation and properties of cellulose laurate/polyethylene glycol phase change energy storage fibers. *Journal of Textiles*, 2016, 37 (04): 7-14.

9. *C. G. Granqvist,* Spectrally Selective Surfaces for Heating and Cooling Applications, Vol. TT01, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1989), ISBN: 9781510616547

10. *I.S. Kravchuk, M.I. Arkhypov, S.M. Turenko, V.I. Shtarnov.* Zakhyst povitryanykh ob'yektiv vid raket z infracher- vonym samonavedennyam. [Protection of air objects from infrared homing missiles]. Kyiv Publishing House "Internauka" 2020. — 296 c DOI: 10.25313/978-966-97817-5-8 (in ukr.)

Отримано 19.12.2026

Received 19.12.2026

*Прийнято до друку 05.02.2026
Accepted for publication 05.02.2026*