

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ОТВОРІВ ВИДУВУ ОХОЛОДЖУВАЧА НА ПЛОСКУ ПЛАСТИНУ

М. А. Данилов¹, А. А. Халатов^{1,2}

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України

² Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

У статті досліджено вплив часткового блокування отворів для видуву охолоджувача, спричиненого забрудненням повітря, на ефективність плівкового охолодження лопаток газових турбін у військових умовах. Чисельне моделювання проведено в ANSYS CFX 2019 R2 із застосуванням SST-моделі турбулентності. Розглянуто параметр вдуву від 0.4 до 1.0 для трьох конфігурацій отворів: без блокування, з 25% і 50% перекриттям перерізу. Встановлено, що блокування знижує ефективність охолодження на 2.7% та 7.9%, при цьому поперечна нерівномірність плівки з максимумами по осі отворів і мінімумами між ними зберігається.

Ключові слова: ефективність плівкового охолодження, забруднення отворів, параметр блокування.

Вступ

Сучасні газотурбінні установки (ГТУ), зокрема у військових умовах (двигуни літаків, танків), працюють за надвисоких температур газу на вході, що сягають 1750°C [1]. Жаростійкі матеріали лопаток, такі як нікелеві суперсплави, витримують лише 1000 – 1100°C [2], що вимагає ефективних методів охолодження для забезпечення їхньої надійності та довговічності. Одним із поширених методів є плівкове охолодження, при якому охолоджуюче повітря подається через систему малих похилих отворів у лопатках, утворюючи захисний повітряний шар, що зменшує теплове навантаження на поверхню [3].

У військових умовах, наприклад, під час операцій у пустельних регіонах, ГТУ зазнають впливу значної кількості пилу та абразивних частинок типу CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ [4] (рис. 1). Ці частинки потрапляють у двигун із вхідним повітрям, подрібнюються у компресорі, нагріваються, а в турбінній секції можуть переходити у розплавлений стан через високі температури [5]. Численні дослідження показують, що навіть часткове забруднення або нерівномірність отворів охолодження, зокрема через блокування або зміну шорсткості, суттєво змінює кут і швидкість викиду охолоджувача, знижуючи загальну ефективність плівкового охолодження [6]. Крім того, експериментально встановлено, що відкладення на поверхні лопатки турбіни можуть нерівномірно формуватись залежно від конфігурації потоку та геометрії елементів, особливо в зонах, схильних до рециркуляції та зниженого тепловідведення [7]. Це призводить до погіршення ефективності плівкового

охолодження та аеродинамічної взаємодії з основним потоком [8, 9]. Попередні роботи [10, 11] не повною мірою враховують вплив забруднення на поперечну нерівномірність розподілу плівкового охолодження, що залишає проблему недостатньо вивченою.

У даній роботі досліджується однорядна схема плівкового охолодження з чотирма отворами видуву, що дозволяє детально вивчити вплив часткового блокування на ефективність охолодження та поперечну нерівномірність розподілу повітря. Ефективність оцінюється за адіабатичною ефективністю [12]:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}^*}{T_2^* - T_{\infty}^*}, \quad (1)$$

де T_{∞}^* – повна температура основного потоку, T_{aw} – адіабатична температура поверхні, T_2^* – температура охолоджувача на виході.



Рис. 1. Блокування отворів плівкового охолодження в реальних умовах у повздовжньому розрізі [4].

Метою роботи є теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні за умов часткового блокування отворів видуву, з акцентом на аналізі поперечної нерівномірності.

1. Комп'ютерне моделювання

Для дослідження використано теоретичний метод із чисельним моделюванням плівкового охолодження в програмному комплексі ANSYS CFX 2019 R2. Ступінь блокування отворів охарактеризовано безрозмірним відношенням h/d , де h – поперечний розмір блокування отворів подачі охолоджувача, d – діаметр отвору вдуву ($d = 0.8$ мм).

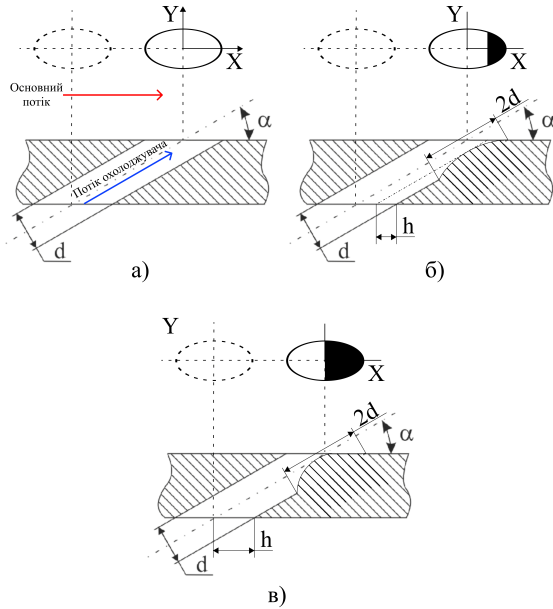


Рис. 2. Геометрія моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через ряд з чотирьох отворів при частковому блокуванні: а – $h/d = 0$; б – $h/d = 0.5$; в – $h/d = 1.0$

Розроблено три геометричні конфігурації (рис. 2): без блокування, а також із частковим блокуванням при $h/d = 0.5$ (25% перекриття) та $h/d = 1.0$ (50% перекриття). Вибір конфігурацій обґрунтовано даними досліджень [4, 13, 8, 9], що відображають реальні умови забруднення. Геометричні параметри моделі наближені до характеристик реальних систем плівкового охолодження газотурбінних лопаток [14]: діаметр отвору $d = 0.8$ мм, поперечний крок $t = 2.4$ мм ($t/d = 3.0$), кут нахилу отворів $\alpha = 30^\circ$. Значення параметра блокування h змінювалось у межах від 0.4 до 0.8 мм.

Тривимірна модель, створена у модулі ANSYS Geometry, містить ряд із чотирьох похилих отворів із різним ступенем блокування, до яких охолоджувач подається з пленуму (рис.3). Для чисельного моделювання застосовано неструктуровану гібридну сітку, сформовану в ANSYS Mesh: у зоні основного потоку використано тетраедричні елементи, біля стінок — призматичні (рис.4). Сітка для моделі без блокування містить 434 тис. вузлів і 1,1 млн елементів.

Граничні умови на вході та виході розрахункової області відповідають параметру вдуву $m = 0.4; 0.6; 0.8; 1.0$. Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 80 °С, температура вто-

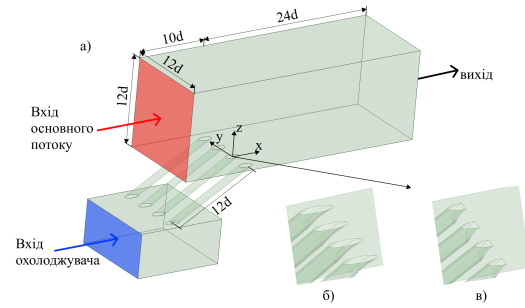


Рис. 3. Геометрична модель часткового блокування отворів вдуву охолоджувача: а – $h/d = 0$; б – $h/d = 0.5$; в – $h/d = 1.0$

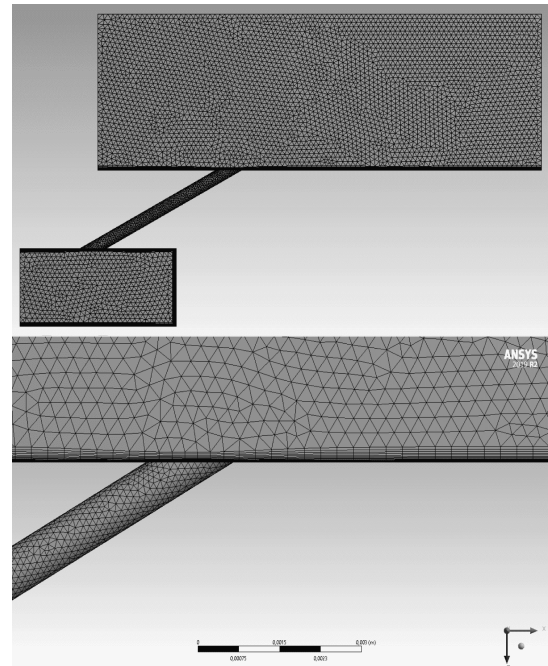


Рис. 4. Неструктуровані геометричні сітки для CFD моделювання у поперечному напрямку та в околі ділянки поверхні вдуву охолоджувача (без блокування) [15].

ринного потоку – 20 °С, інтенсивність турбулентності – 1%. Тверді границі задані як адіабатичні ($\delta Q = 0$), на бічних поверхнях – умови симетрії. Розрахунки виконано із застосуванням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) та SST-моделі турбулентності, яка забезпечує достовірні результати для плівкового охолодження [16].

2. Результати та їх аналіз

Верифікація результатів

На першому етапі проведено верифікацію результатів чисельних розрахунків із експериментальними даними для традиційної схеми плівкового охолодження без блокування ($h/d = 0$) при параметрі вдуву $m = 1.0$ [17, 15]. Відхилення складало 9.68%, що підтверджує достатню точність SST-моделі турбулентності для оцінки ефективності.

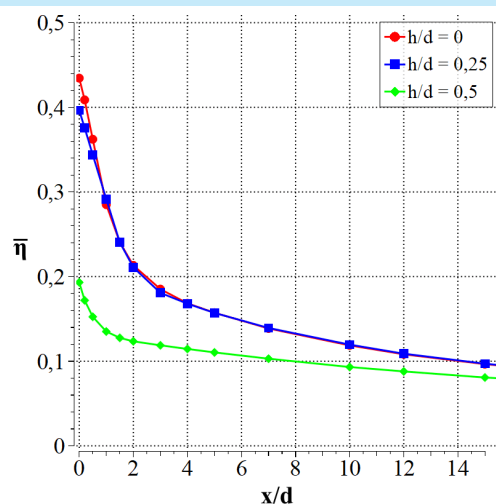


Рис. 5. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 15$, вплив блокування отворів при $m = 0.4$.

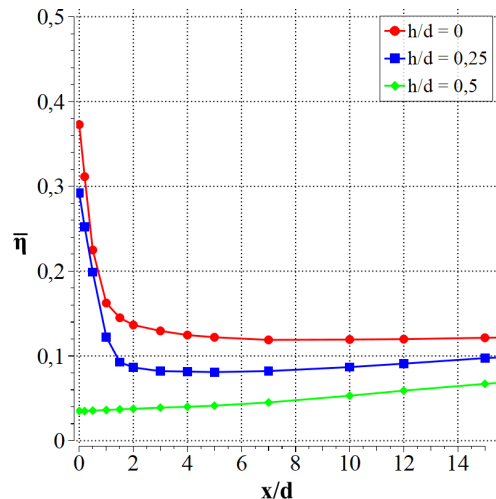


Рис. 7. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 15$, вплив блокування отворів при $m = 0.8$.

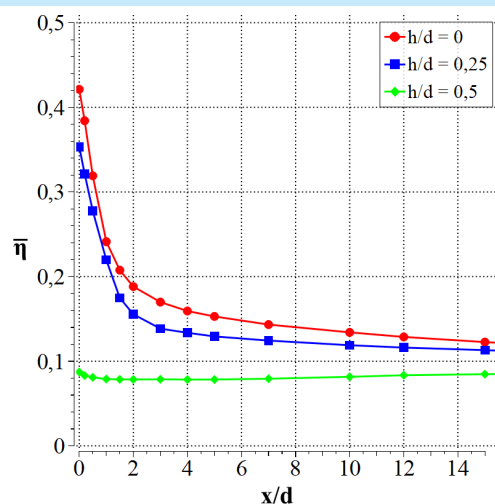


Рис. 6. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 15$, вплив блокування отворів при $m = 0.6$.

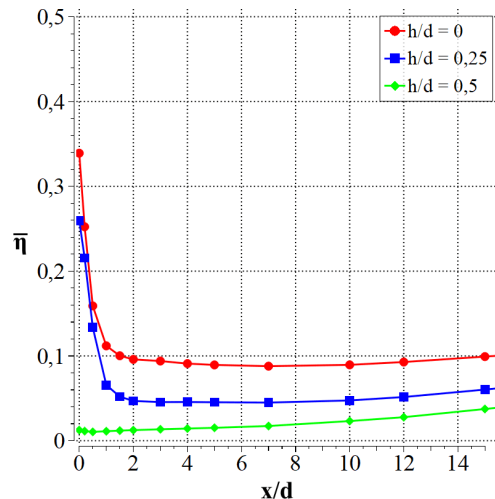


Рис. 8. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 15$, вплив блокування отворів при $m = 1.0$.

Порівняння усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження

Для оцінки усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження використано залежність:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n-1} (\eta_i + \eta_{i+1}), \quad (2)$$

де n – кількість точок ефективності в поперечному напрямку [15].

Аналіз графіків (рис. 5–8) показує, що зі збільшенням параметра блокування h/d ефективність плівкового охолодження знижується через відрив потоку охолоджувача та його змішування з основним потоком.

На початковій ділянці ($0 \leq x/d \leq 2$) для $h/d = 1.0$ при $m = 0.4$ (рис. 5) величина $\bar{\eta}$ падає на 55% (з 0.45 до 0.20), а при $m = 0.6$ (рис. 6) – на 64% (з 0.33 до

0.12), порівняно з $h/d = 0$. Для $m = 0.8$ (рис. 7) зниження становить 60% (з 0.39 до 0.16), а при $m = 1.0$ (рис. 8) – 66% (з 0.35 до 0.12). Це пояснюється зростанням швидкості потоку охолоджувача при вищих m , що посилює відрив. На віддалених ділянках ($2 < x/d \leq 15$) різниця між конфігураціями зменшується: при $m = 0.4$ для $h/d = 0$ величина $\bar{\eta} = 0.15$, а для $h/d = 1.0$ – 0.10 (зниження на 33%); при $m = 0.8$ (рис. 7) для $h/d = 0$ величина $\bar{\eta} = 0.12$, а для $h/d = 1.0$ – 0.09 (25%). Для $m = 1.0$ (рис. 8) на ділянці $x/d \geq 10$ ефективність стабілізується на рівні 0.08–0.10 для всіх h/d , що вказує на значне погіршення теплозахисту через відрив.

Порівняння усередненої по площі пластини ефективності плівкового охолодження

На рис. 9 представлено залежність усередненої по площі ефективності плівкового охолодження для

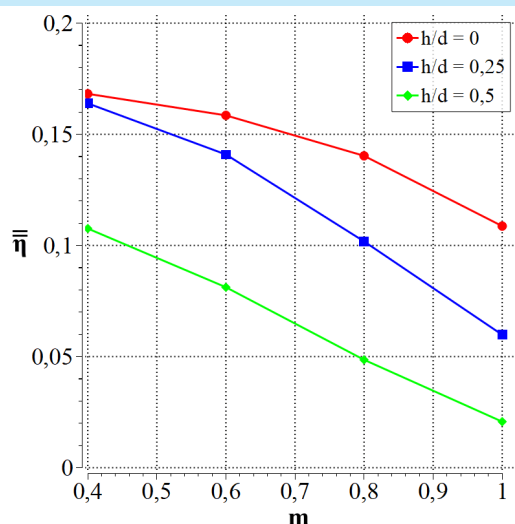


Рис. 9. Залежність усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження за різних значень параметру вдуву m .

різних m (0,4 – 1,0) та h/d . Графік показує, що зі збільшенням m від 0,4 до 1,0 величина $\bar{\eta}$ знижується: для $h/d = 0$ – на 22% (з 0,18 до 0,14), для $h/d = 0,5$ – на 29%, для $h/d = 1,0$ – на 36%. Ступінь блокування суттєво впливає: при $m = 0,4$ для $h/d = 1,0$ ефективність падає на 39%. Найвища ефективність – для моделі без блокування, що пояснюється відривом потоку при блокуванні.

Результати усередненої ефективності плівкового охолодження показали, що зі збільшенням h/d від 0,5 до 1,0 ефективність знижується на 2,7%–7,9%.

Висновки

Результати показали, що зі збільшенням ступеня блокування h/d ефективність плівкового охолодження знижується через відриг потоку охолоджувача на початку отворів. Це спричинено зростанням кута виходу струменя та посиленням змішування з основним потоком, що погіршує теплозахист. Усереднена ефективність зменшується на 2,7% при $h/d = 0,5$ та на 7,9% при $h/d = 1,0$ порівняно з незаблокованою конфігурацією. При зростанні параметра вдуву m поперечна нерівномірність розподілу плівки зберігається через геометрію отворів.

Перелік використаних джерел

1. Effect of particle deposition on film cooling from fan-shaped holes / X. Chen, Y. Wang, Y. Long, S. Weng // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2021. — Vol. 181. — P. 122028.
2. *Gualco G. C. High-Temperature Materials for Gas Turbine Applications*. — ResearchGate Publication, 2023. — ISBN 978-93-94166-01-1.
3. Khalatov A. A., Panchenko N. A., Severin S. D. Numerical simulation of a flat plate film cooling with coolant supply into different shape indentations // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2017. — Vol. 24, no. 5. — P. 751–757.
4. Effect of partial blockage on film cooling with cylindrical and fan-shaped holes / X. Chen, Y. Wang, Y. Long, S. Weng // *International Journal of Thermal Sciences*. — 2021. — Vol. 164. — P. 106866.
5. Evaluation of heat transfer on turbine vanes : tech. rep. / L. D. Hylton, M. S. Mihelc, E. R. Turner, [et al.] ; NASA Contractor Report 168015. — 1983.
6. Lee S., Hwang W., Yee K. Robust design optimization of a turbine blade film cooling hole affected by roughness and blockage // *International Journal of Thermal Sciences*. — 2018. — Vol. 133. — P. 216–229.
7. Bunker R. S. Film cooling technology for gas turbines: a review // *Journal of Turbomachinery*. — 2020. — Vol. 142, no. 8. — P. 081004.
8. Turbine Nozzle Guide Vane Endwall Cooling with Blocked Holes / B. Bai, X. Chen, H. Zhang, [et al.] // *Journal of Turbomachinery*. — 2025. — Vol. 147, no. 10. — P. 101003.
9. Statistical evaluation of cooling unsteadiness under blockage and pulsed mainstream / L. Ma, R. Yao, X. Liu, [et al.] // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. — 2024. — Vol. 155. — P. 107496.
10. Experimental study on deposition on a turbine vane with film-cooling / Z. Liu, F. Zhang, Z. Liu, W. Diao // *Aerospace Science and Technology*. — 2020. — Vol. 107. — P. 106340.
11. Walters D. K., Leylek J. H. Detailed analysis of film cooling physics // *Journal of Fluids Engineering*. — 2021. — Vol. 143, no. 2. — P. 021401.
12. Simulation of film cooling via trench holes / A. A. Khalatov, N. A. Panchenko, I. I. Borisov, V. V. Severin // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2017. — Vol. 90. — P. 1–7.
13. Xu K., He K., Yan X. Effects of cooling hole blockage on heat transfer and film cooling effectiveness of gas turbine squealer tip // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2025. — Vol. 112. — P. 109678.
14. Халатов А. А., Борисов И. И., Кобзар С. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. 11: Вихревые технологии термогазодинамики. — Днепр : Лира ЛТД, 2024. — С. 168.
15. Данилов М. А., Дониш Т. В. Вплив закупорки отворів вдуву на ефективність плівкового охолодження // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси і установки. — 2023. — 4(16). — С. 45–50.
16. Li X., Zhang Y. Numerical investigation of film cooling performance using RANS-SST on a flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2020. — Vol. 149. — P. 106672.
17. Перспективные схемы пленочного охлаждения. Т. 10 / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Б. Резник. — Киев : Изд-во «Политехника», 2016. — С. 238.