

УДК 621.438.016.4

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЧИСЕЛЬНИХ ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ПЛОСКІЙ ПОВЕРХНІ: ТЕНДЕНЦІЇ, ПОХИБКИ ТА КОРЕЛЯЦІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ

О. В. Шевчук

Oleh.Shevchuk@iecc.khpi.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1837-6287

Національний технічний
університет «Харківський
політехнічний інститут»,
61002, Україна, м. Харків,
вул. Кирпичова, 2

АТ «Івченко-Прогрес»,
69068, Україна, м. Запоріжжя,
вул. Іванова, 2

У статті проведено аналіз сучасних чисельних методів моделювання плівкового охолодження на плоскій поверхні з урахуванням тенденцій розвитку CFD-технологій у 2019–2025 рр. Розглянуто понад 25 публікацій, присвячених тривимірним (3D CFD) розрахункам ефективності плівкового охолодження для різних типів отворів — циліндричних, фасонних, нестационарних та комбінованих. Наведено порівняння застосовуваних моделей турбулентності, параметрів сітки та методів валідації з експериментальними даними. Показано, що навіть незначна похибка у визначенні ефективності охолодження ($\pm 0,02$) може спричинити відхилення понад 20°C у прогнозі температури плівки при реальних умовах двигуна. Встановлено, що зворотне виконання отворів плівкового охолодження забезпечує суттєве підвищення ефективності при великих параметрах вдуву m , тоді як пряме виконання є переважним для малих m . Для фасонних отворів вплив складного кута вдуву β не є незначним і повинен враховуватися в інженерних розрахунках. Виявлено необхідність урахування відношення питомої теплоємності газу та охолоджувача при масштабуванні результатів з лабораторних до двигунних умов. Здійснено порівняльний аналіз відомих 1D-кореляцій: показано, що формули Baldauf переважно завищують ефективність охолодження циліндричних отворів, а залежності Colban — занижують для фасонних. Це вказує на потребу розробки оновлених узагальнених залежностей, що враховують сучасні CFD-дані та параметри теплоємності. Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних CFD-досліджень плівкового охолодження, встановленні впливу напрямку отворів і параметра m на ефективність охолодження, а також у пропозиції врахування теплофізичних властивостей середовищ при масштабуванні результатів.

Ключові слова: плівкове охолодження, CFD-моделювання, параметр вдуву, ефективність охолодження, газотурбінний двигун, газова турбіна, камера згоряння.

Вступ

Проблема підвищення ефективності систем охолодження лопаток турбіни без зниження їх аеродинамічних характеристик є одним із ключових напрямів розвитку сучасного турбінобудування. Одним з основних методів зовнішнього охолодження є плівкове охолодження, яке дозволяє зменшити тепловий потік до поверхні лопатки шляхом формування охолоджувальної плівки з витіканням повітря через отвори перфорації. При цьому точність прогнозування ефективності плівкового охолодження безпосередньо впливає на надійність і ресурс турбінних лопаток.

Завдяки розвитку чисельних методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) з'явилася можливість відтворювати складні тривимірні течії охолоджувача та основного потоку, проте результати таких розрахунків часто суттєво залежать від вибору моделей турбулентності, структури розрахункової сітки, умов граничних поверхонь та температурного діапазону. Це визначає актуальність систематизації сучасних CFD-досліджень, аналізу їх похибок і співставлення з експериментальними даними з метою уточнення інженерних методів оцінки ефективності плівкового охолодження.

Температури газу на виході з камери згоряння сучасних газотурбінних двигунів досягли рівня 2000–2100 К. Ці рівні температур значно перевищують температури працездатності існуючих матеріалів. Саме тому для забезпечення надійної роботи лопаток потрібно розвивати технології їх охолодження. Для цього поряд з конвективним (внутрішнім) охолодженням застосовується плівкове (зовнішнє або загороджувальне) охолодження, яке полягає у випуску охолоджувача на поверхні лопатки, що захищаються, з метою відтискування від них гарячого газу. Тим самим зменшується тепловий потік від газу до лопатки. Моделювання і розрахунок плівкового охолодження на ранніх етапах проектування було і залишається актуальною і непростою задачею. При сучасних рівнях температур газу похибка у визна-

ченні ефективності плівкового охолодження (1) всього біля 0,1 призводить до похибки у визначенні T_f більш ніж на 100 °C [1]

$$\eta = \frac{T_g - T_f}{T_g - T_c}, \quad (1)$$

де T_g – температура газу; T_f – температура плівки, яка є сумішшю газу та охолоджувальної рідини, тобто повітря з температурою T_c .

Для розуміння неприпустимості таких похибок і важливості точного визначення ефективності плівкового охолодження лопаток треба відзначити, що згідно з Riccardo Da Soghe та ін. [2] зниження температури охолоджувальної рідини лише на 15 К може збільшити термін служби лопатей ротора вдвічі. D. G. Bogard і K. A. Thole [3] зазначають, що зниження температури профілю лопатки всього на 25 °C може збільшити термін служби лопаток у два рази, що правда в статті говориться о наземних установках. Згідно з [4] при піднятті температури газу на 40 °C і температури охолоджуючого повітря на 18 °C розрахунковий ресурс робочої лопатки ТВТ впав більше ніж удвічі.

На ефективність плівкового охолодження впливає ряд факторів, а саме розташування отворів перфорації щодо газового потоку (кути нахилу вісі отвору до стінки α і до напрямку основного потоку β), форма й щільність отворів перфорації плівкового охолодження, число рядів і відстань між рядами отворів, відносна довжина отворів, кривизна й шорсткість поверхні, наявність ТЗП, а також параметр вдуву m отвору плівкового охолодження (2)

$$m = \frac{\rho_c \cdot w_c}{\rho_g \cdot w_g}, \quad (2)$$

де ρ_c і ρ_g – густина повітря і газу; w_c і w_g – швидкості повітря і газу.

Вплив майже всіх вищенаведених факторів на ефективність плівкового охолодження перевіряється експериментально або чисельно на плоскій пластині. Сьогодні чисельні 3D CFD розрахунки на плоскій поверхні – це звичний процес перевірки нових типів і систем плівкового охолодження. Одним із важливих питань таких розрахунків є валідація чисельного методу, тобто обраної сітки, моделі турбулентності і інших опцій розрахунку з результатами експериментальних даних. Деякі автори, наводячи приклад задовільного збігу результатів розрахунку з результатами експериментів надають величину похибки ефективності охолодження біля 10%. Тут постає питання, наскільки обґрунтованим є оцінка похибки відносної величини, якою є ефективність охолодження η , у відносних одиницях, тобто відсотках. Звісно, при повторюванні експерименту з низькими температурами охолоджувача і газу така похибка не є значущою, але при перенесенні без змін цієї похибки у визначенні ефективності охолодження на реальні умови двигуна ситуація значно змінюється. Очевидно, що з урахуванням вищенаведеного при рівні ефективності плівкового охолодження $\eta \approx 0,5$ така похибка у 10% може досягати 50 °C у визначенні T_f , у той час як при ефективності $\eta \approx 0,1$ лише 10 °C.

У цьому аспекті інтерес викликає робота [5], що присвячена питанню масштабування результатів на установці до очікуваних результатів на двигуні по рідко зустрічаючись у літературі критерію TR (temperature ratio), який у цій статті представлений як відношення температури основного потоку до температури охолоджуючого повітря і знаходився у діапазоні 0,5–2,3. Автори розглядали як внутрішнє, так і зовнішнє плівкове охолодження і наводять результат, що був отриманий за допомогою моделі низького порядку, який говорить, що при сполученому масштабуванні результатів при переході від умовної установки з типовими значеннями $TR=1,20$ до двигуна з параметром $TR=2,0$ величина загальної ефективності охолодження соплового апарату (не плівкового охолодження) підвищується з 0,418 до 0,450.

Можливо це питання є однією з причин появи ще одного параметру при узагальненні експериментальних і чисельних робіт з дослідження ефективності плівкового охолодження. Так, в останні роки у наукових статтях все частіше зустрічається параметр ACR – advective capacity ratio [6, 7] (або перша його назва HCR – heat capacity ratio від Marc D. Polanka і J. L. Rutledge [8]) який, окрім густини та швидкості охолоджувача і газу оперує також їх питомою теплоємністю c_p (3)

$$ACR = \frac{\rho_c \cdot c_{pc} \cdot w_c}{\rho_g \cdot c_{pg} \cdot w_g}. \quad (3)$$

Параметр ACR перевершує параметр вдуву m або імпульс I – momentum ratio (4) чи DR – density ratio (5) але також має свої недоліки. Так, згідно зі статтями, схоже що при величині імпульсу I більший за 0,5 параметр ACR втрачає свою здатність точно моделювати експеримент

$$I = \frac{\rho_c \cdot w_c^2}{\rho_g \cdot w_g^2}; \quad (4)$$

$$DR = \frac{\rho_c}{\rho_g}. \quad (5)$$

Але, тим не менше, сьогодні саме параметр вдуву m є головним узагальнюючим параметром з дослідження ефективності і інших параметрів плівкового охолодження.

В даній статті зроблений аналіз сучасних (2019–2025 р.) статей, що стосуються 3D CFD аналізу ефективності плівкового охолодження саме на плоскій поверхні. Наводяться сучасні тенденції таких розрахунків і їх результати стосовно ефективності охолодження. Дані щодо параметрів розрахунку (експерименту), сітки, моделі турбулентності і похибки у визначенні ефективності плівкового охолодження зведені у підсумкову таблицю. У іншій главі зроблений аналіз деяких 1D кореляційних залежностей у визначенні ефективності плівкового охолодження на плоскій поверхні.

Мета роботи

Метою даної публікації є проведення огляду сучасних робіт з 3D CFD розрахунками ефективності плівкового охолодження на плоскій пластині для різних типів отворів, аналіз параметрів 3D розрахунків і аналіз похибки визначення ефективності плівкового охолодження, а також аналіз 1D кореляційних залежностей по визначенню ефективності плівкового охолодження на плоскій пластині.

3D CFD розрахунки плівкового охолодження на плоскій поверхні

Безумовно на сьогоднішній день найпоширенішими отворами плівкового охолодження в світі є класичні циліндричні отвори, які є добре дослідженими і які є найпростішими з точки зору виконання. В останні роки чисельні CFD дослідження цих отворів на плоскій поверхні у чистому вигляді ведуться лише для випадків базового варіанту подальшої модернізації форми отвору чи для верифікації розрахункової моделі. Однак багато статей останніх років використовує циліндричний отвір не в чистому вигляді, а для CFD дослідження впливу додаткових факторів на ефективність

охолодження, тобто поєднання циліндричного отвору з іншою особливістю геометрії (рис. 1). Такими факторами можуть бути вдування у траншею [9–11] чи кратери [12, 13], використання своєрідних бар'єрів вище по потоку для більшого проникнення охолоджувача у пристінний шар [14, 15] чи генераторів вихорів нижче по потоку [16], дослідження ефекту зовнішнього блокування циліндричного отвору продуктами згоряння [17] чи дослідження впливу внутрішньої структури потоку охолоджувача (перед входом у отвір) на плівкове охолодження [18–20].

Вищенаведені приклади з використанням траншей, кратерів, попередніх бар'єрів чи генераторів вихорів ще не знайшли масового використання у лопатках газових турбін. Окрім можливого зниження технологічності і міцності лопатки такі рішення можуть мати й інші негативні ефекти, як, наприклад підвищення коефіцієнту тепловіддачі зі сторони газу, що може частково або повністю нівелювати позитивний ефект від модернізованого (відносно звичайного циліндричного отвору) плівкового охолодження.

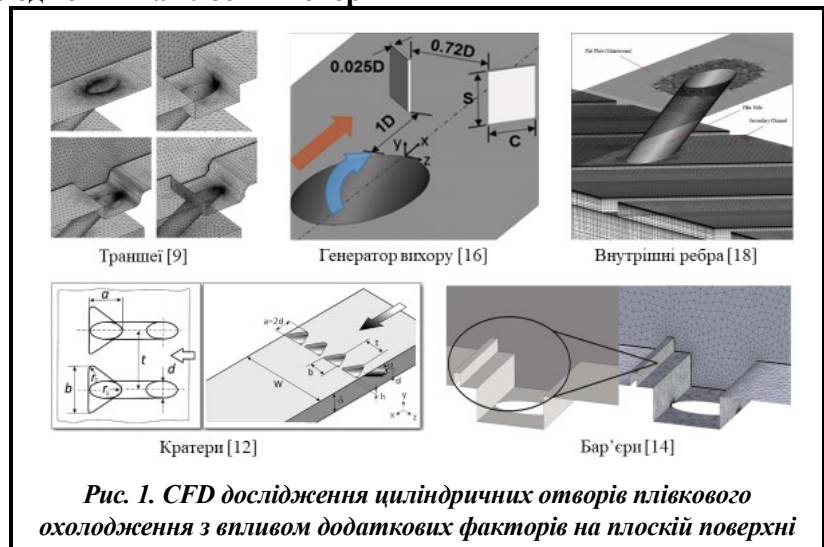


Рис. 1. CFD дослідження циліндричних отворів плівкового охолодження з впливом додаткових факторів на плоскій поверхні

На сьогодні однією з найбільш успішних технологій плівкового охолодження лопаток є використання профільованих (фасонних) отворів, що дозволяє у 2–3 рази знизити швидкість охолоджувача на виході з отвору за рахунок збільшення вихідного перерізу та розширення струменю у поперечному напрямі, що значно підвищує ефективність охолодження і покращує покриття поверхні [21]. Найбільш поширеними серед профільованих отворів є віялові (fan-shaped) отвори. Вони можуть розширюватися не тільки в бічному напрямі, а і у вертикальній площині (laidback fan-shaped).

Одним із самих популярних фасонних отворів плівкового охолодження, що відноситься до групи laidback fan-shaped є отвір типу 7-7-7, в якому два кути розширення в бічному β_{lat} і один в передньому β_{fwd} напрямках дорівнюють 7 кожен, що пояснює його назву (рис. 2). В статті [22] представлено чисельне дослідження впливу шорсткості поверхні такого отвору на ефективність охолодження.

На рис. 2 кут $\alpha=30^\circ$, $\beta_{lat}=7^\circ$, $\beta_{fwd}=7^\circ$, довжина отвору дорівнює $6D$, з яких довжина циліндричної ділянки дорівнює $2,5D$, а довжина ділянки розширення $3,5D$. Діаметр отвору дорівнював $7,75$ мм. Автори показали, що шорсткість поверхні має сильний вплив на ефективність охолодження. При параметру вдуву $m=1,5$ осереднена по поверхні ефективність охолодження отвору з грубою шорсткістю впала на 44% порівняно з гладкою. При високому параметрі вдуву $m=3,0$ падіння ефективності охолодження становить 59%. Автори пояснюють такий ефект тим, що шорсткість поверхні внутрішніх стінок отвору спричиняє утворення товстіших граничних шарів всередині охолоджувального отвору, що змінює ядро струминного потоку на виході з охолоджувального отвору. Таким чином, введений охолоджувач більше зміщується з гарячим газом основного потоку і ефективність плівкового охолодження знижується.

У статті [23] порівнюється отвір 7-7-7 і нові типи отворів криволінійної структури на його базі з бічними кутами відхилення від осі $\theta=7^\circ$, 14° , $17,5^\circ$ і 21° (рис. 3). Секція розширення створюється обертанням круглого отвору на площині нахилу навколо осі, нормальної до цієї площини. Ця форма була розроблена для зменшення погіршення впливу ниркових вихорів шляхом належного розподілу потоку теплоносія, що виходить з області виходу отвору.

Висновки, що роблять автори, є такими: зі зростанням кута θ ефективність плівкового охолодження зростає і найвищі показники ефективності становлять при куті $\theta=21^\circ$, у той час як при куті $\theta=7^\circ$ показники ефективності найгірші із за маленької площі отвору на виході. Отвори з кутами $\theta=14^\circ$, $17,5^\circ$ і 21° демонструють вищу ефективність охолодження ніж стандартний отвір 7-7-7.

Як і для класичного циліндричного отвору значна кількість CFD досліджень на плоскій поверхні стосується впливу різноманітних додаткових факторів на ефективність вже стандартного віялового отвору 7-7-7. Тільки за останній 2025 рік можна перелічити декілька робіт з конференцій ETC і ASME. Так, вплив числа Рейнольдса на ефективність отвору 7-7-7 з вдуванням у траншею досліджується у [24], дослідження впливу випинання вище по потоку над отвором 7-7-7 представлено у [25], а дослідження впливу внутрішнього перехресного потоку на ефективність охолодження отвору 7-7-7 наведено у [26].

Вимоги до вихідної крайки лопатки є не менш важливими, ніж до коритця і спинки, що зумовлено її геометричними і аеродинамічними обмеженнями. Для зменшення аеродинамічних втрат вихідна крайка лопатки повинна бути досить тонкою. Проте, ця вимога суперечить забезпеченню ефективної системи охолодження вихідної крайки, яку неможливо повною мірою організувати при її тонкому ви-

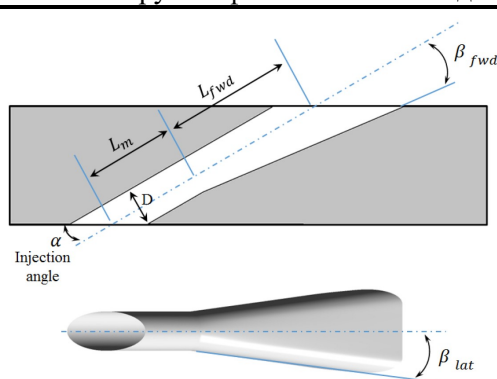


Рис. 2. Геометрія віялового отвору з вертикальним розширенням 7-7-7 ($\beta_{lat}=7^\circ$, $\beta_{fwd}=7^\circ$) [22]

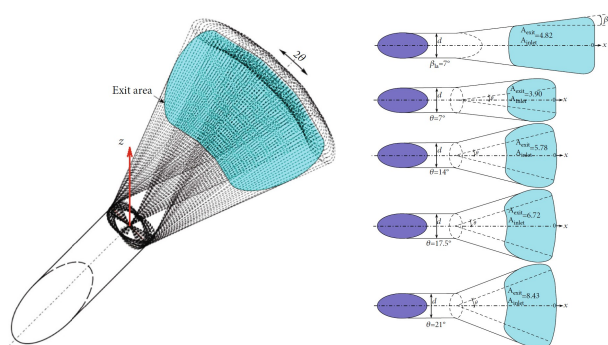


Рис. 3. Геометрія віялового отвору з вертикальним розширенням 7-7-7 [23]

конанні. Часто цей компроміс між охолодженням і аеродинамікою призводить до того, що саме вихідна крайка має максимальні температури перетину лопатки. Виріз матеріалу на частині коритця у вихідній крайці, відомий як «cutback» сприяє зменшенню товщини вихідної крайки водночас маючи властивості щільного плівкового охолодження. Цей різновид щільного плівкового охолодження досліджується на плоскій поверхні у [27] з використанням SAS (Scale Adaptive Simulation) метода. SAS здатний відтворювати періодичні явища та розрізняти когерентні структури вихорів. Автори досліджували декілька варіантів геометрії вирізу, а саме пряму і округлу форми вихідної крайки, а також різні форми стрижневих стовпчиків в каналі – циліндричні і еліптичні. По даним авторів, закруглені форми кромки демонструють очевидне збільшення ефективності охолодження на задній частині поверхні зрізу і зменшують інтенсивність перемішування. Еліптичні стрижневі стовпчики, що орієнтовані по потоку значно покращують ефективність охолодження порівняно з базовими циліндричними, у той час як такі ж стовпчики, що орієнтовані по висоті різко знижують сумарну ефективність охолодження (рис. 4).

Особливу роль у застосуванні перспективних типів отворів плівкового охолодження відіграє розвиток адитивних технологій 3D друку, який дозволяє розглядати інноваційні системи плівкового охолодження. Дані отвори не можуть бути отримані звичайним пропалом у тілі лопатки.

У статті [28] Michael T. Furgeson та ін. у результаті оптимізації базового профілю отвору 7-7-7 на плоскій поверхні отримали отвори зі складною формою з виступаючими у формі дюни поверхнями з двох сторін отвору (рис. 5). Як зазначають автори, ці підвищеності впливають на основний потік, утворюючи пару вихрів, що обертаються у протилежних напрямках. Ці вихори ускладнюють відділення охолоджувача від зовнішньої поверхні і одночасно збільшують розтікання струменю. Таким чином, розрахункова ефективність охолодження двох оптимізованих форм значно вища за стандартний отвір 7-7-7.

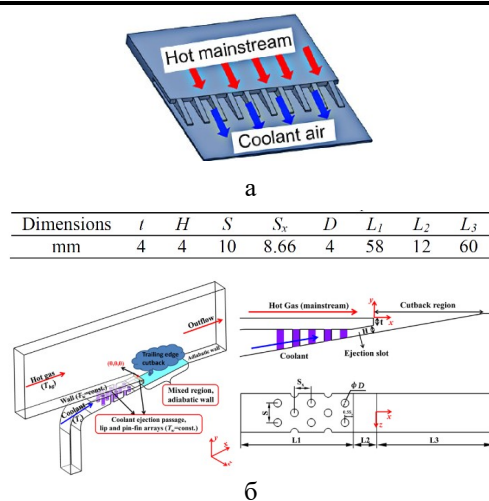


Рис. 4. Щільне плівкове охолодження вихідної крайки:

а – загальний вид зрізу «cutback» (з мережі Інтернет);
б – модель чисельного дослідження щільного плівкового охолодження зі стрижневими стовпчиками згідно з [27]

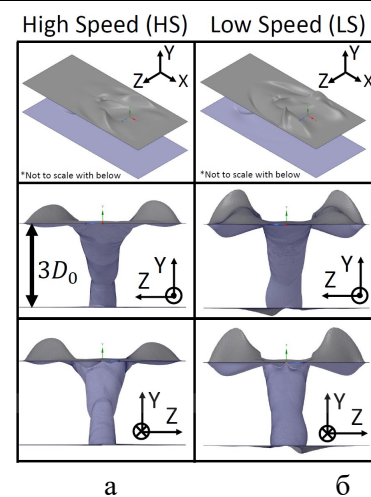


Рис. 5. Дизайн отвору перфорації, отриманий згідно з [28] на базі отвору 7-7-7 для чисел Маху:

а – 0,75 (high speed); б – 0,15 (low speed)

У статтях [29] і [30] Н. Sharma та ін. на плоскій поверхні чисельно досліджують тип отворів «струменевого колювання» (SJ – «sweeping jet») плівкового охолодження. Це нова нестационарна технологія охолодження, яка використовує періодичні колювання струменя охолоджувача з боку в бік завдяки двом періодичним вихорам, що створюються всередині каналу і обертаються в протилежному напрямку. Колювання струменя покращує покриття поверхні плівкою. У [29] два типи отворів, а саме стаціонарний прямий і нестационарний отвір струменевого колювання (рис. 6) досліджуються в двох варіантах – прямому (по потоку) і в зворотному (на зустріч потоку) виконаннях в нестационарній (URANS) постановці. Дещо дивно, але дивлячись на результати розрахунків можна зробити висновок, що при параметрах вдуву $m=0,7$, $m=1,0$, $m=2,0$ саме прямий варіант, що направлений по потоку демонструє

найкращу бічну осереднену по часу ефективність охолодження, при чому цей вииграш доволі суттєвий на всьому діапазоні x/D від 0 до 60. Лише при малому параметрі вдуву $m=0,35$ дещо кращу ефективність демонструє отвір струменевого коливання, але також в прямому (по потоку) виконанні. Отвір струменевого коливання і прямий отвір, що виконані в зворотному виконанні (направлені проти потоку) демонструють відносно низьку осереднену по часу ефективність охолодження при всіх параметрах вдуву.

Але, на відміну від результатів [29] схоже, що частіше зворотне виконання отворів плівкового охолодження дає позитивний ефект і він є тим більшим, чим вищим є параметр вдуву m . Причиною є можливість отримання більш рівномірного покриття охолоджувачем поверхні за отвором з одночасним зменшенням відриву струменя охолоджувача від поверхні.

У статті [31] чисельно досліджуються три види отворів, а саме класичний циліндричний отвір перфорації, фасонний профільований отвір, що розширюється в бічних і передньому напрямках і віялоподібний фасонний отвір (рис. 7). Всі отвори нахилені під кутом $\alpha=35^\circ$ з кроком $3D$. Всі типи отворів досліджуються в двох варіантах – прямому (по потоку) і в зворотному (на зустріч потоку) виконаннях при восьми параметрах вдуву від 0,25 до 2,0. Зворотне впорскування, на відміну від прямого, формує вихори, які швидко руйнуються і тому не відбувається змішування основного та охолоджувального потоків, що покращує рівномірність охолодження і його ефективність. Так, згідно з даними статті для параметру вдуву $m=1$ перехід від прямого виконання циліндричного отвору до зворотного може підвищити ефективність поверхневого охолодження на 86,4%, а саме з 0,131 до 0,245. І чим вище буде параметр вдуву, тим більше буде користь від зворотного виконання циліндричного отвору. Це пов'язано не тільки з відомим фактом падіння ефективності прямого циліндричного отвору з ростом параметру вдуву, а й з невинним ростом ефективності охолодження зворотного циліндричного отвору з ростом параметру вдуву. Для інших двох профільованих типів отворів, виконаних у зворотному до газу напрямленні також з ростом параметру вдуву відбувається підвищення поверхневої ефективності охолодження. Так, при параметрі вдуву $m=2,0$ досягається максимальна поверхнева ефективність охолодження зворотно направлених отворів, що дорівнює 0,32 для циліндричного отвору, 0,50 для отвору, що розширюється в бічних і передньому напрямках і 0,55 для віялоподібного отвору. Цікавим нюансом, який треба підкреслити, є те, що згідно зі статтею мають місце параметри вдуву, нижче котрих поверхнева ефективність охолодження зворотно виконання буде нижчою за пряме виконання. Для циліндричного отвору це $m=0,5$, для отвору, що розширюється в бічних і передньому напрямках, це $m=0,75$ і для віялового отвору це $m=1,25$.

Близькі до вищенаведених дані отримані і у [32]. Автори також зазначають, що при низьких параметрах вдуву, а саме при $m=0,25$ і $m=0,5$ класичні циліндричні отвори, що направлені по потоку мають перевагу в ефективності охолодження, а при високих параметрах вдуву ($m=1,0$ і $m=1,5$) зворотні отвори є більш ефективними. При чому при $m=1,5$ загальна ефективність вища у зворотнього отвору на 677% порівняно з прямим.

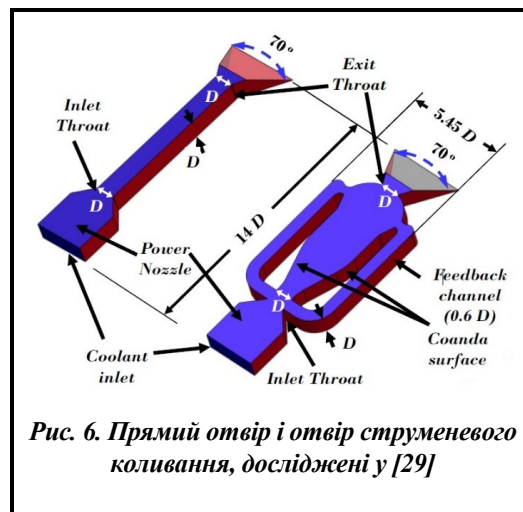


Рис. 6. Прямий отвір і отвір струменевого коливання, досліджені у [29]

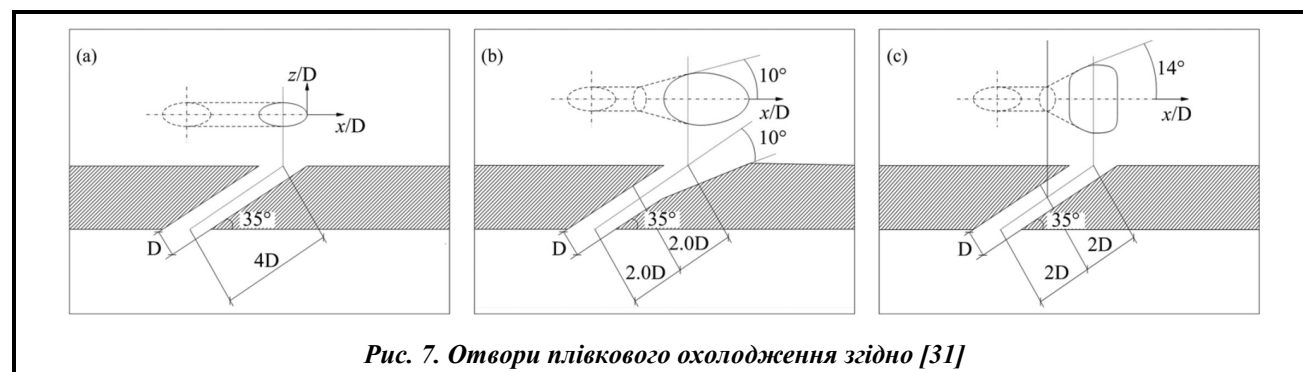


Рис. 7. Отвори плівкового охолодження згідно [31]

У роботі [33] проводиться чисельне дослідження ефективності циліндричних отворів у порівнянні з віяловими отворами типу FDH («Forward diffuse hole») з переднім кутом розширення 15° , орієнтованих під кутом $\beta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ і 180° до потоку газу при різних параметрах вдуву m . Кути нахилу α в усіх випадках були рівними 35° . Дослідження велись для двох параметрів вдуву: $m=0,6$ і $m=1,25$.

Отвори FDH продемонстрували найвищу осереднену по площині ефективність охолодження при розташуванні їх під кутом $\beta=90^\circ$, а саме 0,377 при $m=0,6$ і 0,483 при $m=1,25$. Циліндричні отвори показали найвищу осереднену по площині ефективність охолодження при розташуванні їх під кутом $\beta=180^\circ$ (рис. 8). Результати, що наведені у даній роботі частково йдуть у розріз з [21], де зазначається, що на відміну від циліндричних, для фасонних отворів вплив складного кута на ефективність плівкового охолодження є незначним, і його можна не враховувати в інженерних розрахунках. Отвір FDH виявився навіть більш чутливим до складного кута ніж класичний циліндричний отвір.

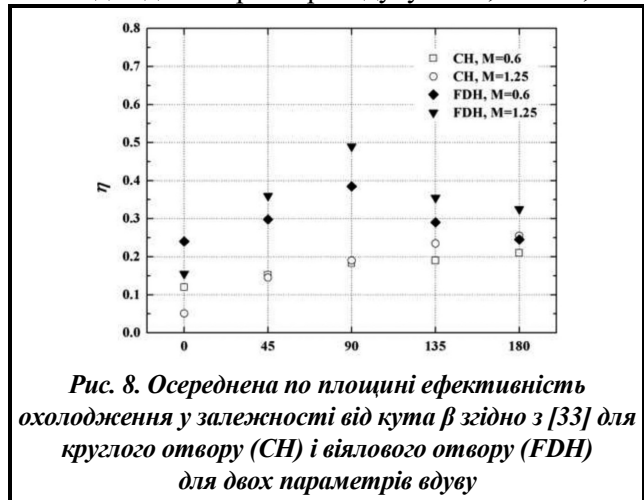


Рис. 8. Осереднена по площині ефективність охолодження у залежності від кута β згідно з [33] для круглого отвору (CH) і віялового отвору (FDH) для двох параметрів вдуву

Сучасні статті [9–33] 2019–2025 років, що наведені у цій главі, стосувались розрахунку різних типів плівкового охолодження на плоскій пластині. Статті були узагальнені і деякі основні параметри розрахунку (відношення густини охолоджувача до густини основного потоку DR , температури основного потоку T_g і охолоджувача T_c , турбулентність основного потоку), а також тип розрахункової сітки і модель турбулентності з використаним програмним пакетом були зведені у табл. 1. Основною категорією у цій таблиці є визначення абсолютної, а не відносної, похибки розрахунку ефективності охолодження при порівнянні з експериментом.

У табл. 1 величина похибки при порівнянні з експериментом є абсолютною величиною зі знаком плюс (якщо розрахунок ефективності охолодження перевищив значення експерименту) чи мінус (коли розрахунок нижче експерименту). Риска замість значення похибки означає, що порівняння велось за іншими критеріями, наприклад за коефіцієнтом витрати чи коефіцієнтом тепловіддачі. У табл. 1 наведена максимальна абсолютна похибка серед різних параметрів вдуву при збереженні її сталого тренду, тобто це не місцевий «пік», а яскраво виражена різниця між експериментом і розрахунком. Різниця в ефективності охолодження менша ніж 0,02 позначена як «добре».

Треба відмітити, що це наблизені дані порівняння з експериментом, які не враховують допуски на похибку експерименту [10], чи добре співпадіння з розрахунковими даними інших авторів і погане з експериментом [15], чи різницю між геометричними і режимними параметрами розрахунку і експериментами, які були взяті за основу.

Аналізуючи табл. 1 можна зробити декілька висновків, а саме:

- RANS методи використовуються все ще в абсолютній більшості випадків. Дві найбільш популярні моделі турбулентності при моделюванні різних типів плівкового охолодження серед RANS методів – це двопараметричні k - ϵ realizable і k - ω SST моделі;

- всі розрахунки велись при тих же температурах, при яких виконувався і експеримент, отже температури умовного повітря і умовного газу в основному не перевищують 350 K і є доволі близькими один до одного;

- лише у половині випадків орієнтовна похибка між розрахунком і експериментом складає менше ніж 0,02, що в умовах сучасного двигуна може означати похибку до 20°C у визначенні температури плівки.

Таблиця 1. Огляд параметрів розрахунку в сучасних роботах з дослідження плівкового охолодження на плоскій поверхні

Рік	Автор	Тип отвору	DR	T_w K / T_c K	Турбулентність основного потоку, %	Розрахункова сітка	Метод / модель турбулентності	Програмний пакет	Похибка при валідації ефективності охолодження з експериментом
2019	Z. Zhao та ін. [31]	Ц, Ф	1,60	370 / 310	2,5	С	RANS / k - ϵ realizable	–	+0,02 (Ц) добре (Ш)
2019	D. Zheng та ін. [14]	Т	0,97	298 / 318	2,0	Т	RANS / k - ϵ standard	CFX	добре (Ц)
2020	A. Khalatov та ін. [12]	К	1,20	293 / 353	1,0	Т	RANS / k - ω SST	CFX	+0,04 (Б)
2020	S. Hussain, Xin Yan [15]	Ц	1,60	298 / 188	0,2	С	RANS / k - ω	CFX 11.0	+0,20 (Ц) -0,04 (Б)
2020	C.S. Lee та ін. [16]	Ц	1,60	298 / 188	–	С	RANS / k - ϵ realizable	Fluent	–
2020	B. Li та ін. [18]	Ц	–	–	0,9	С	RANS / k - ϵ realizable	–	добре (Б)
2020	J. Wang а ін. [32]	Ц	1,20	300 / 250	–	С	RANS / k - ϵ standard	Fluent 18.0	+0,04 (Ц)
2020	S. Tamang та ін. [33]	Ц, Ф	–	300 / 188	0,2	С	RANS / k - ω SST	Fluent 1-9.1	добре (Ц)
2020	A. Zamiri та ін. [22]	Ф	1,50	295 / 196	0,5	С	LES / WALE	CFX 19.3	добре (Б)
2020	Y. Li та ін. [27]	Щ	–	500 / 293	7,0	П	SAS	Fluent 18.0	добре (Ш)
2021	R. Zhang та ін. [9]	Т	1,08	321 / 296	–	Т	RANS / k - ϵ realizable	–	добре (Ш)
2021	A. Bakhshinejad Bahambari та ін. [10]	Т	–	300 / 320	3,0	Г	RANS / k - ϵ realizable	Fluent 18.0	+0,02 (Ш)
2022	F. Yang, Mohammad E. Taslim [23]	Ф	0,97	320 / 300	3,9	С	RANS / k - ϵ realizable	Fluent	-0,06 (Ш) -0,08 (П)
2022	H. Zhu та ін. [19]	Ц, П	–	303 / 293	1,2	С	RANS / k - ϵ realizable	Fluent 15.0	-0,03...+0,03 (Б)
2022	R. Liu та ін. [20]	Ц	–	600 / 303	–	Т	RANS / k - ω SST	CFX 19.3	–
2023	Т. В. Доник та ін. [13]	К	0,83	303 / 363	1,0	Н	RANS / k - ω SST	–	+0,06 (Ш)
2023	М. Данилов, Т. Доник [17]	Ц	–	293 / 353	1,0	Т	RANS / k - ω SST	CFX 19.2	добре (Ш)
2023	L. Fischer та ін. [11]	Т	2,00	373 / 187	1,0	Т	RANS / k - ω GEKO (ад.)	Fluent 22.1	-0,1...+0,05 (Б)
2024	H. Sharma та ін. [29]	Н	1,80	300 / 167	5,0	Т	URANS / k - ω SST	Fluent 21.0	–
2025	H. Sharma та ін. [30]	Н	1,80	300 / 167	0,5	П	URANS / k - ω SST	Fluent 21.0	–
2025	G. Barigozzi та ін. [24]	Ф	–	295 / –	–	Г	LES / WALE	Fluent 23.1	добре (Б)
2025	G. Barigozzi та ін. [25]	Ф	1,50	295 / 196	3,0	Г	LES / WALE	Fluent 21.1	–
2025	M. T. Furgeson та ін. [28]	Ф	–	315 / –	$\leq 1,0$	П	RANS / k - ϵ realizable	Fluent	+0,05...0,15 (П)
2025	S. Avcun та ін. [26]	Ф	1,50	295 / –	0,5	П	RANS / k - ϵ realizable	Fluent	добре (Б)

Тип отвору: Ц – циліндричні отвори; Т – циліндричні отвори з вдуванням у траншею; К – циліндричні отвори з вдуванням у кратери; П – циліндричні парні отвори; Ф – фасонні отвори; Щ – щілинний зріз на кориті (cutback); Н – нестационарні за принципом дії отвори.

Розрахункова сітка: С – структурована (блочна) сітка; Т – тетраедрична сітка; П – поліедрична (багатогранна сітка); Н – неструктурована сітка; Г – гібридна полігексаедрична або тетрагексаедрична сітка.

Порівняння з експериментом: (Ц) – по центральній лінії; (Б) – бічне (латеральне) осереднення; (Ш) – осереднення по ширині (spanwise averaged); (П) – осереднення по поверхні (area averaged); (В) – візуальне порівняння розподілу ефективності охолодження на плоскій пластині (flat plate).

1D кореляційні залежності з визначення ефективності плівкового охолодження для плоскої пластини

У рамках інженерної роботи при проектуванні охолоджуваного вінця на етапі ескізного проектування потрібен інструмент для швидких і досить точних розрахунків температурного стану ряду передбачуваних варіантів охолодження для вибору оптимальної конструкції. Використання повної тривимірної CFD моделі є дорогокоштуючими і затратними по часу. На ранніх стадіях (концептуальний або ескізний проекти) є сенс проводити десятки розрахунків на спрощених моделях.

У 2002 році Baldauf та ін. [34] представили результати експериментальних досліджень ефективності плівкового охолодження за рядом циліндричних отворів, що розташовані на плоскій пластині. Вимірювання проводились у досить широких діапазонах геометричних і режимних параметрів: кутах нахилу вісі отвору до стінки $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ і до напрямку основного потоку $\beta=0^\circ$, при відносному кроці отворів $t/D=2, 3, 5$, з відносною повздовжньою довжиною нижче за потоком $x/D=0-80$, з параметром $DR=1,2; 1,5; 1,8$, параметром вдуву $m=0,2-2,5$, числах Рейнольдсу $Re=6800-14000$, що визначались по діаметру отвору і параметрам основного потоку. Турбулентність основного потоку складала 1,5% і 4,0%. У результаті узагальнення експериментальних даних авторами отримані емпіричні залежності для розрахунку ефективності плівкового охолодження за рядом циліндричних отворів на плоскій пластині.

У роботі Baldauf та ін. наведений приклад розрахунку ефективності плівкового охолодження. Розрахунок параметру b_0 по формулі (31), наведеній у даній роботі показав, що результати розрахунку не співпадають зі значенням цього параметру, наведеного у прикладі. Порівняння результатів розрахунку ефективності плівкового охолодження при різних режимних і геометричних параметрах продемонструвало краще співпадіння результатів розрахунків з результатами експериментів при штучній зміні параметру b_0 формули.

При порівнянні результатів експериментальної роботи K. Watanabe та ін. [35] з результатами по формулам Baldauf для отворів під кутом $\alpha=30^\circ$ і з відносним кроком $5D$, але з параметром $DR=0,9$, що дещо виходить за параметри, досліджені у статті Baldauf, можна зробити висновок, що бічна ефективність плівкового охолодження, що отримана по формулам Baldauf при низьких параметрах вдуву $m=0,5$ і $m=1,0$ в середньому на 0,04 вища ніж в експерименті, а максимальна різниця знаходиться при $x/D \approx 7$, де формули Baldauf демонструють максимальну ефективність. При високих параметрах вдуву $m=1,5$ і $m=2,0$ ця різниця зменшується вдвічі. Експериментальне дослідження для таких же отворів під кутом $\alpha=30^\circ$ і з відносним кроком $5D$ наведене у порівнянні з результатами Baldauf у роботі U. Sandri та ін. [36]. Результати згідно Baldauf також дають дещо вищу ефективність ніж в експерименті при $x/D > 5$, але в даному випадку різниця ніде не перевищує 0,02, що можна назвати добрим співпадінням. Не співпадіння розрахунків з результатами Baldauf при малих значеннях x/D при параметрах вдуву $m=0,5$ і $m=1,0$ демонструється також у [37]. Показано, що деякі експериментальні дані також лежать нижче за результати Baldauf на всьому діапазоні x/D при $m=1$. Можна зробити висновок, що в більшості випадків методика Baldauf дає завищені результати ефективності плівкового охолодження циліндричних отворів.

У 2011 році Will F. Colban та ін. [38] представили кореляційну залежність (6–7) для профільованих отворів перфорації, що мають кут нахилу вісі отвору до стінки $\alpha=30^\circ$. Формули мають також доволі суттєвий діапазон застосування при різних геометричних і режимних параметрів: параметрі вдуву $m=0,2-2,5$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\frac{P}{t} + C_1 M^{C_2 \xi C_3}}, \quad (6)$$

в якій

$$\xi = \frac{4}{\pi} \frac{X/D \cdot P/D}{M \cdot AR}. \quad (7)$$

У статті автори зазначають, що дані формули дають результат, що добре узгоджується з експериментальними результатами. Однак, у вищенаведеній роботі U. Sandri та ін. [36] результати розрахунку профільованого отвору плівкового охолодження 7-7-7 по кореляціям Will F. Colban та ін. [38] демонструють явно занижені результати відносно експерименту. Причому бічна ефективність охолодження згідно експерименту в середньому на 0,1 вища ніж за кореляціями Colban на всьому діапазоні $x/D=0-20$ і при всіх досліджених параметрах вдуву $m=0,5-1,5$. Хоча треба відзначити, що тренд ефективності охолодження згідно формулам є близьким до експериментальних даних (рис. 9).

У роботі [39] також відзначається, що наявні кореляції для розрахунку профільованих отворів, у тому числі і кореляції Colban переважно занижують ефективність охолодження. У роботі також зазначається, що між різними кореляціями існує дуже велике відхилення, і що жодна кореляція не може дати прийняттого прогнозу ефективності набору довідкових даних для всього досліджуваного діапазону параметрів. Також жодну кореляцію не можна визначити як "найкращу", але в цій роботі вказані явно помилкові кореляції, серед яких перша робота Baldauf (1997) і Brown (1979).

Перспективи подальших досліджень

Подальший розвиток тематики передбачає:

- створення розширеної бази CFD-розрахунків для різних типів отворів плівкового охолодження в умовах, наближених до реальних параметрів газотурбінного двигуна ($T_g > 1500$ K, $Ma > 0,5$);
- розроблення нових узагальнених безрозмірних критеріїв, які включатимуть вплив теплоємності, густини та імпульсу охолоджувача;
- формування уточнених 1D-кореляцій для інженерного прогнозування ефективності плівкового охолодження;
- перевірку достовірності результатів CFD-моделювання шляхом прямих експериментальних досліджень при високотемпературних режимах.

Реалізація цих напрямів дозволить підвищити точність прогнозування теплового стану лопаток і надійність турбінних елементів у сучасних газотурбінних двигунах. Таким чином, проведена систематизація сучасних CFD-досліджень плівкового охолодження дозволить у подальшому створити метод розрахунку плівкового охолодження для різних форм отворів та їх розташування в тілі лопаток газових турбін.

Висновки

1. Проведений аналіз сучасних CFD-досліджень плівкового охолодження на плоскій поверхні показав, що у переважній більшості робіт використовуються RANS-методи з моделями турбулентності k - ϵ realizable та k - ω SST.
2. Структура розрахункової сітки (структурована чи неструктурована) не є вирішальним чинником у забезпеченні точності результатів, натомість суттєвий вплив мають граничні умови.
3. Виявлено закономірність впливу напрямку отворів плівкового охолодження: зворотне виконання забезпечує підвищення ефективності при високих значеннях параметра вдуву m , тоді як пряме виконання є більш ефективним при малих m .
4. Для фасонних (профільованих) отворів вплив складного кута вдуву β є значущим і повинен враховуватися при інженерному проектуванні елементів охолодження.
5. У більшості CFD-досліджень розрахунки виконуються при низьких температурах газу та охолоджувача (до 350 K), що не враховує впливу реального співвідношення питомих значень теплоємності середовищ. При масштабуванні результатів на умови двигуна необхідно вводити поправки на c_p , інакше можливе систематичне завищення або заниження ефективності залежно від типу отворів.
6. Спроба зафіксувати ефективність охолодження, отриману на плоскій пластині і масштабовану по параметру вдува без врахування c_p на умови двигуна загрожує відсунення графіку ефективності охолодження по масштабному параметру праворуч. Якщо виходити з того, що ефективність охолодження циліндричних отворів падає зі зростанням параметра вдува, а ефективність охолодження фасонних отворів, навпаки, зростає, то можна зробити висновок, що при переході від установки до двигуна при нехтуванні величиною c_p має місце заниження ефективності охолодження циліндричних отворів і завищення від фасонних отворів. Дійсно і зворотне, що при врахуванні c_p величина ефективності плівкового охолодження з циліндричними отворами в умовах двигуна повинна дещо зрости, а для фасонних отворів знизитись (порівняно з розрахунками на плоскій пластині).

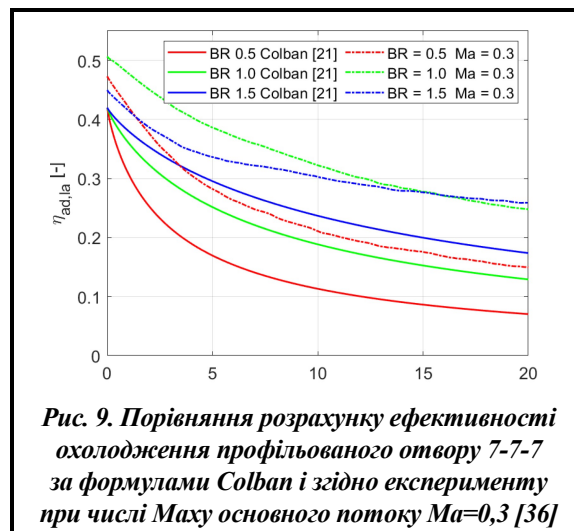


Рис. 9. Порівняння розрахунку ефективності охолодження профільованого отвору 7-7-7 за формулами Colban і згідно експерименту при числі Маху основного потоку $Ma=0,3$ [36]

7. Аналіз існуючих кореляційних залежностей показав, що формули Baldauf [34] переважно завищують ефективність охолодження для циліндричних отворів, а залежності Colban [38] – занижують для фасонних. Це підтверджує потребу у розробленні нових емпіричних моделей, що базуються на сучасних CFD-результатах і враховують теплофізичні властивості робочих середовищ.

Література

1. Петельчиц В. Ю., Халатов А. А., Письменный Д. Н., Дашевский Ю. Я. Адаптация SST модели турбулентности для моделирования пленочного охлаждения плоской пластины. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Т. 3. № 12 (63). 2013. С. 25–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.14874>.
2. Da Soghe R., Bianchini C., D'Errico J. Numerical characterization of flow and heat transfer in preswirl systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018. Vol. 140. Iss. 7. Article 071901. 12 p. <https://doi.org/10.1115/1.4038618>.
3. Bogard, D. G. & Thole, K. A. (2006). Gas turbine film cooling. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 22, no. 2, pp. 249–270. <https://doi.org/10.2514/1.18034>.
4. Шевчук О., Тарасов О. Оптимізація системи охолодження робочої лопатки ТВТ за допомогою 1D-2D підходів. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»: тези доповідей XX міжнародної науково-технічної конференції (26–27 грудня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 23–24.
5. Naidu A. D., Povey T. Impact of temperature ratio on overall cooling performance: Low-order-model-based analysis of experiment design. *Journal of Turbomachinery*. 2023. Vol. 149. Iss. 5. Article 91006. 18 p. <https://doi.org/10.1115/1.4062279>.
6. Wiese C. J., Rutledge J. L., Polanka M. D. Experimental evaluation of thermal and mass transfer techniques to measure adiabatic effectiveness with various coolant to freestream property ratios. *Journal of Turbomachinery*. 2017. Vol. 140. Iss. 2. Article 021001. 9 p. <https://doi.org/10.1115/1.4038177>.
7. Di Lella J. P., Wiese C. J., Rutledge J. L. The relative effects of internal Reynolds number and advective capacity ratio on the coolant warming factor. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition: Proceedings paper* (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper No. GT2025-152999, V005T12A016. 10 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-152999>.
8. Rutledge J. L., Polanka M. D. Computational fluid dynamics evaluations of unconventional film cooling scaling parameters on a simulated turbine blade leading edge. *Journal of Turbomachinery*. 2014. Vol. 136. Iss. 10. Paper 101006. 9 p. <https://doi.org/10.1115/1.4028001>.
9. Zhang R., Zhou L., Xing J., Luo C., Du X. Numerical evaluation of film cooling performance of transverse trenched holes with shaped lips. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 125. Article 105326. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105326>.
10. Bakhshinejad Bahambari A., Kayhani M. H., Norouzi M. On the effect of geometry of w-wave trenches on film cooling performance of gas turbine blades. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2021. Vol. 235. Iss. 7. P. 1595–1618. <https://doi.org/10.1177/09576509211008277>.
11. Fischer L., James D., Jeyaseelan S., Pfitzner M. Optimizing the trench shaped film cooling design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 214. Article 124399. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124399>.
12. Khalatov A., Shi-Ju E., Wang D., Borisov I. Film cooling evaluation of a single array of triangular craters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 159. Article 120055. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120055>.
13. Доник Т., Ступак О., Потапов С., Ланьков Б. Плівкове охолодження на пласкій поверхні за одним рядом трикутних заглиблень з виїмкою при зовнішній турбулентності. *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*. 2023. № 3. С. 34–40. <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2023.03.05>.
14. Zheng D., Wang X., Zhang F., Yuan Q. Numerical investigation on the dual effect of upstream steps and transverse trenches on film cooling performance. *Journal of Aerospace Engineering*. 2019. Vol. 32. Iss. 4. Article 04019028. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0001007](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0001007).
15. Hussain S., Yan X. Implementation of hole-pair in ramp to improve film cooling effectiveness on a plain surface. *ASME turbo expo 2020: Turbomachinery technical conference and exposition: Proceedings paper* (September 21–25, 2020). American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 7B. Paper No. GT2020-14838, V07BT12A035. 12 p. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14838>.
16. Lee, C.- Sh., Bryden, K. M., & Shih, T. I.-P. (2020). Downstream vortex generators to enhance film-cooling effectiveness. *ASME turbo expo 2020: Turbomachinery technical conference and exposition: Proceedings paper* (September 21–25, 2020). American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 7B. Paper No. GT2020-14317, V07BT12A009. 10 p. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14317>.

17. Данилов М., Доник Т. Вплив блокування отворів видуву охолоджувача на ефективність плівкового охолодження. *Вісник ХТУ «ХП»*: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2023. № 4. С. 45–50. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.04.06>.
18. Li B., Liu C., Ye L., Zhu H., Zhang F. (2020). Experimental and numerical study on the effects of the relative position of film hole and orientation ribs on the film cooling with ribbed cross-flow coolant channel. *ASME turbo expo 2020: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (September 21–25, 2020). American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 7B. Paper No. GT2020-14389, V07BT12A011, 14 p. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14389>.
19. Zhu H., Xie G., Zhu R., Sunden B. Effects of internal coolant crossflow on film-cooling performance of double-jet and cylindrical holes. *ASME turbo expo 2022: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 13–17, 2022, Rotterdam, Netherlands). American Society of Mechanical Engineers, 2022. Vol. 6A. Paper No. GT2022-82514, V06AT12A028. 11 p. <https://doi.org/10.1115/gt2022-82514>.
20. Liu R., Li H., You R., Tao Z. Multi-parameters sensitivity analysis of overall cooling effectiveness on turbine blade and numerical investigation of internal cooling structures on heat transfer. *ASME turbo expo 2022: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 13–17, 2022, Rotterdam, Netherlands). 2022. Vol. 6A. Paper No. GT2022-82372, V06AT12A026. 10 p. <https://doi.org/10.1115/gt2022-82372>.
21. Халатов А. А., Борисов І. І., Кулішов С. Б. Розвиток систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Т. 44. № 2. С. 70–83. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.9>.
22. Zamiri A., You S. J., Chung J. T. Numerical evaluation of surface roughness effects on film-cooling performance in a laidback fan-shaped hole. *ASME turbo expo 2020: Turbomachinery technical conference and exposition: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (September 21–25, 2020). American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 7B. Paper No. GT2020-14525, V07BT12A019. 9 p. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14525>.
23. Yang F., Taslim M. E. Experimental and numerical studies of the film cooling effectiveness downstream of a curved diffusion film cooling hole. *International Journal of Rotating Machinery*. 2022. Vol. 2022. Iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1155/2022/9913692>.
24. Barigozzi G., Zamiri A., Brumana G., Franchina N., Taek Chung J. On the impact of Reynolds number on the performance of a trenched shaped hole. Proceedings of the 16th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics (ETC16) (March 24–28, 2025, Hannover, Germany). 2025. Paper ID ETC2025-107. 10 p. <https://doi.org/10.29008/ETC2025-107>.
25. Barigozzi G., Zamiri A., Brumana G., Carnevale M., Chung J. T. On the impact of upstream bump geometry on the aerothermal performance of a 7-7 shaped hole. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper No. GT2025-152365, V005T12A008. 14 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-152365>.
26. Avcun, S., Erdem, E., Sal, S., & Yasa, T. (2025). The effect of crossflow velocity on the film cooling effectiveness of fan shaped holes. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper No. GT2025-154073, V005T12A029. 12 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-154073>.
27. Li Y., Xu H., Wang J., Song W., Wang M., Liu T., Wang X. Application of scale adaptive simulation model to studying cooling characteristics of a high pressure turbine blade cutback trailing edge with different cooling configurations. *ASME turbo expo 2020: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (September 21–25, 2020). American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 7B. Paper no. GT2020-14234, V07BT12A006. 13 p. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14234>.
28. Furgeson M. T., Flachs E. M., Bogard D. G. Adjoint optimization of gas turbine film cooling geometry with elevated mainstream Mach number. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper no. GT2025-154287, V005T12A034. 14 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-154287>.
29. Sharma H., Mistry C. S., Roy A. Sweeping jet film cooling over the suction surface of HP turbine NGV with forward and reversed hole configurations. *ASME turbo expo 2024: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 24–28, 2024, London, United Kingdom). American Society of Mechanical Engineers, 2024. Vol. 7. Paper no. GT2024-129582, V007T12A047. 14 p. <https://doi.org/10.1115/gt2024-129582>.
30. Sharma H., Kumar K. S. P., Roy A., Mistry C.S. Effect of blowing configurations on heat transfer augmentation with multihole sweeping jet film cooling. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition*: Proceedings paper (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper no. GT2025-153525, V005T12A026. 13 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-153525>.

31. Zhao Z., He L. M., Dai S., Shao S. Computational research on film cooling performance of different shaped holes with backward and forward injection. *AIP Advances*. 2019. Vol. 9. Iss. 5. Article 055009. <https://doi.org/10.1063/1.5091573>.
32. Wang J., Liu C., Zhao Z., Baleta J., Sundén B. Effect and optimization of backward hole parameters on film cooling performance by Taguchi method. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 214. Article 112809. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112809>.
33. Tamang S., Kwon H., Choi J., Ligrani P., Lee H., Jung G., Park H. Numerical investigation of adiabatic film cooling effectiveness through compound angle variations. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2020. Vol. 78. Iss. 10. P. 595–618. <https://doi.org/10.1080/10407782.2020.1803600>.
34. Baldauf S., Scheurlen M., Schulz A., Wittig S. Correlation of film-cooling effectiveness from thermographic measurements at enginelike conditions. *Journal of Turbomachinery*. 2002. Vol. 124. Iss. 4. P. 686–698. <https://doi.org/10.1115/1.1504443>.
35. Watanabe K., Matsuura M., Suenaga K., Takeishi K. I. An experimental study on the film cooling effectiveness with expanded hole geometry. Proceedings of the international gas turbine congress, 1999 Kobe TS-48. 1999. P. 615–622.
36. Sandri U., Polanka M. D., Picchi A., Andreini A., Facchini B. Adiabatic effectiveness measurements of film cooling in supersonic flow. *ASME turbo expo 2025: Turbomachinery technical conference and exposition: Proceedings paper* (June 16–20, 2025, Memphis, Tennessee, USA). American Society of Mechanical Engineers, 2025. Vol. 5. Paper No. GT2025-152900, V005T12A013. 15 p. <https://doi.org/10.1115/gt2025-152900>.
37. Müller M., Morsbach C. Assessment of source term and turbulence model combinations for film cooling in turbines. Proceedings of the 15th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics (April 24–28, 2023, Budapest, Hungary). 2023. Paper ID ETC2023-281. 16 p. <https://doi.org/10.29008/etc2023-281>.
38. Colban W. F., Thole K. A., Bogard D. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface. *Journal of Turbomachinery*. 2010. Vol. 133. Iss. 1. Article 011002. 11 p. <https://doi.org/10.1115/1.4002064>.
39. Bradley A., Wren J. Comparison of correlations and experiments for prediction of vane film cooling in gas turbines: Report of Department of Management and Engineering Division of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics LIU-IEI-R-10/0102-SE. Sweden, Linköping: Linköping University, Institute of Technology. 9 p. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:611589/FULLTEXT01.pdf>.

Надійшла до редакції 26.10.2025