

УДК 536.24:621.438

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ОТВОРІВ ВИДУВУ ОХОЛОДЖУВАЧА

Халатов А.А.<sup>1</sup>, академік НАНУ, д.т.н., Данилов М.А.<sup>2</sup>, аспірант

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>.

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, провідний інженер, e-mail: danylovmykhailo24@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0265-1286>.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.1>

У статті досліджено вплив часткового блокування отворів для видуву охолоджувача, спричиненого забрудненням повітря, на ефективність плівкового охолодження лопаток газових турбін у військових умовах експлуатації ГТУ. Дослідження виконано за допомогою чисельного моделювання в комерційному пакеті ANSYS CFX 2019 R2 із застосуванням SST-моделі турбулентності. Розглянуто діапазон параметра вдуву від 0.4 до 1.0 для трьох конфігурацій отворів охолодження: без блокування та з частковим блокуванням, що відповідає 25% та 50% перекриття поперечного перерізу отворів. Встановлено, що зростання ступеня блокування знижує ефективність охолодження на 2.7% та 7.9% відповідно, а поперечна нерівномірність розподілу плівки зберігається, з максимумами по осі отворів і мінімумами між ними.

The article investigates the impact of partial blockage of coolant injection holes, caused by air contamination, on the film cooling effectiveness of gas turbine blades under military operating conditions of gas turbine units (GTUs). The study was conducted using numerical simulations in the commercial software package ANSYS CFX 2019 R2 with the application of the SST turbulence model. A range of blowing ratios from 0.4 to 1.0 was considered for three cooling hole configurations: without blockage, and with partial blockage corresponding to 25% and 50% obstruction of the hole cross-sectional area. It was found that an increase in the degree of blockage reduces cooling effectiveness by 2.7% and 7.9%, respectively, while the transverse non-uniformity of the film distribution persists, with maxima along the hole axes and minima between them.

Бібл. 21, рис. 14, табл. 1.

**Ключові слова:** дкомп'ютерне моделювання, ефективність плівкового охолодження, забруднення отворів, параметр блокування.

### Вступ

Сучасні газотурбінні установки (ГТУ) вимушені функціонувати в екстремальних умовах, зокрема в військових ГТУ (двигунах літаків, гелікоптерів, танків), де вони працюють за умов надвисоких температур газу на вході, що досягають 1750 °С [1]. Однак жаростійкі матеріали лопаток турбін, такі як нікелеві суперсплави, мають граничну термостійкість на рівні 1000–1100 °С [2], що вимагає використання ефективних методів охолодження для забезпечення їхньої довговічності та надійності. Одним із поширених підходів 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, зокрема під час операцій у пустельних або запиленних регіонах, ГТУ зазнають впливу значної кількості пилу, піску та інших абразивних частинок, таких як CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> [4].

Ці частинки потрапляють у двигун разом із вхідним повітрям, спочатку контактуючи з компресором, де вони подрібнюються і нагріваються, а потім досягають турбінної секції (внутрішнє охолодження лопаток, зовнішнє обтікання), в ній вони можуть переходити у розплавлений чи розм'якшений стан через високі температури повітря [9]. Утворення відкладень відбувається внаслідок складної взаємодії частинок із поверхнею лопаток: дрібні частинки (менше 3 мкм) мають вищу схильність до осадження через турбулентну дифузію, тоді як більші частинки (понад 5 мкм) можуть спричинити ерозію або навіть частково видаляти існуючі відкладення [12]. Дослідження показують, що відкладення частинок у запиленних умовах призводять до значної деградації охолодження протягом перших етапів експлуатації, що характерно для військових операцій [10]. У таких умовах відкладення призводять до часткового або повного блокування отворів подачі охолоджувача, що суттєво впливає на ефективність

плівкового охолодження, змінюючи швидкість і кут викиду охолоджувача та погіршуючи його аеродинамічну взаємодію з основним потоком [5–7].

Значний внесок у вивчення проблеми забруднення зробили автори роботи [5], які показали, що ефективність плівкового охолодження залежить від коефіцієнта блокування отворів, причому зростання ступеня блокування може знизити ефективність охолодження до 39,4% за певних параметрів вдуву, тоді як кут блокування має менший вплив. У роботі [6] досліджено, що у випадку подвійного ряду отворів блокування в першому або другому ряді по-різному впливає на ефективність охолодження, підкреслюючи важливість геометричної конфігурації. У дослідженні [7] аналізувалися ефекти блокування одного отвору видуву під дією пульсуючого потоку, однак поперечний розподіл ефективності охолодження залишився поза увагою. Додатковий аналіз літератури показує, що робота [11] звертає увагу на загальні аспекти плівкового охолодження, але не торкається проблем забруднення, тоді як у роботі [13] досліджуються різні конфігурації отворів без урахування впливу часткового блокування. У дослідженні [14] розглядається аеродинаміка плівкового охолодження, але вплив забруднення також не аналізується. Для поглиблення розуміння природи утворення відкладень, у роботі [15] досліджено, що частинки розміром 2–20 мкм найчастіше осідають на передній кромці та поблизу задньої кромки тискової сторони лопатки, причому частинки розміром 10 мкм мають найбільшу схильність до осадження. У роботі [16] підтверджено, що відкладення великих частинок на поверхні лопаток переважно зосереджуються на передній кромці та тисковій стороні через інерційні зіткнення, тоді як дрібні частинки розподіляються більш рівномірно через турбулентну дифузію. Дослідження [17] підкреслює, що температура поверхні лопатки та швидкість частинок суттєво впливають на товщину відкладень, причому підвищення температури сприяє переходу частинок у розплавлений стан, що посилює їх прилипання. Таким чином, питання впливу забруднення на поперечну нерівномірність розподілу плівкового охолодження залишається недостатньо вивченим.

У даній роботі розглянуто однорядну схему плівкового охолодження, що складається з чотирьох отворів видуву, що дозволяє детально дослідити вплив часткового блокування отворів (рис. 1) на ефективність плівкового охолодження та поперечну нерівномірність розподілу охолоджувального повітря.

Досконалість систем плівкового охолодження оцінюється за адіабатичною ефективністю [8], яка визначається за формулою:

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

де  $T_{\infty}^*$  – повна температура основного потоку;  $T_{aw}$  – адіабатична температура поверхні, що охолоджується;  $T_2^*$  – температура охолоджувача на виході з отвору

Таким чином, питання кореляції між ступенем блокування отворів та ефективністю плівкового охолодження є важливою науково-технічною проблемою. Особливо актуальна дане питання при експлуатації ГТУ в бойових умовах, де присутнє значне запилення повітря.

Метою роботи є теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження пласкої поверхні при частковому блокуванні отворів видуву охолоджувача. Розглядається традиційна схема плівкового охолодження з подачею охолоджувача через ряд похилих отворів. Для визначення ефекту блокування виконані розрахунки ефективності плівкового охолодження при відсутності блокування. Особливу увагу приділено впливу поперечної нерівномірності плівкового охолодження, що оцінюється завдяки моделюванню чотирьох отворів видуву.

Досліджується вплив часткового блокування отворів на ефективність плівкового охолодження при різних параметрах вдуву, що дозволить розширити розуміння фізичних механізмів цього процесу та визначити умови належного функціонування системи охолодження лопаток ГТУ.

### Матеріали і методи досліджень

Враховуючи складність процесів гідродинаміки та теплообміну, в роботі прийняте рішення використовувати теоретичний метод дослідження. Чисельне



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

*3 – зігтермічна обробка моно сировини;*

*Fig. 1. Blockage of film cooling holes in real conditions in a longitudinal section [4]*

дослідження плівкового охолодження виконано за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX 2019 R2.

Розроблено три геометричні конфігурації: базова конфігурація без блокування, а також конфігурації з частковим блокуванням (рис. 2).

Для характеристики ступеня блокування отворів введено безрозмірне відношення  $h/d$ , де  $h$  – поперечний розмір блокування отворів подачі охолоджувача, а  $d$  – діаметр отвору вдуву в яких відбувається блокування отвору (діаметром 0,8 мм) на 25% для  $h/d = 0.5$  та на 50% для  $h/d = 1.0$  відповідно. Конфігурації блокування були підібрані з огляду робіт [4-7], що відображають максимально наближену до реальності конфігурацію забруднення.

Геометричні розміри розрахункової моделі підібрано близькими до розмірів реальних систем плівкового охолодження лопаток газових турбін [18]. Діаметр отвору становить  $d = 0,8$  мм, поперечний крок між отворами  $t = 2,4$  мм ( $t/d = 3.0$ ), кут нахилу отворів до поверхні  $\alpha = 30^\circ$ . Параметр блокування ( $h$ ) змінювався в межах від 0.4 мм до 0.8 мм.

Тривимірний (3D) геометричний модель плівкового охолодження плоскої поверхні була створена в модулі Geometry пакету ANSYS. Модель представляє собою ряд похилих отворів із різним ступенем блокування, до яких охолоджувач подається з зовнішнього об'єму (пленуму), як показано на рис. 3.

Для чисельних розрахунків використано неструктуровану гібридну розрахункову сітку, створену в модулі ANSYS Mesh. Сітка складається з тетраедричних елементів у зоні основного потоку та призматичних елементів у зонах згущення сітки поблизу твердих стінок, які є межами каналів розрахункової моделі.

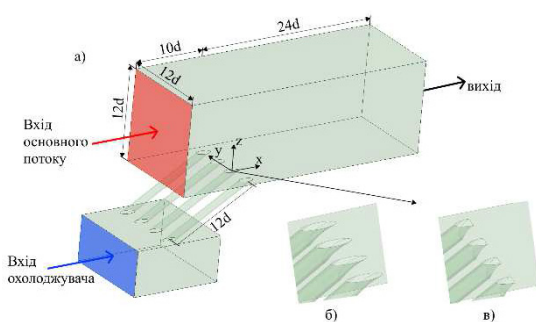


Рис. 2. Геометрична модель часткового блокування отворів вдуву охолоджувача.

Fig. 2. Geometric model of partial blockage of coolant blowing holes:

$$a - h/d = 0; \quad б - h/d = 0,5; \quad в - h/d = 1,0$$

Загальна кількість вузлів розрахункової сітки залежить від розмірів моделі та кількості отворів плівкового охолодження. Для конфігурації без блокування сітка налічує приблизно 434 тисячі вузлів і 1.1 мільйона елементів (див. рис. 4).

Граничні умови на вході і виході розрахункової області підібрані до значень параметра вдуву близьким до  $m = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ .

Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 80 °С. Температура вторинного потоку – 20 °С. Інтенсивність турбулентності основного потоку приймалася рівною 1%.

Тверді границі розрахункової області були задані для адиабатної стінки ( $\delta Q = 0$ ). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії.

Дослідження проводилися з використанням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). Для замкнення системи рівнянь застосовано SST-модель турбулентності, яка забезпечує достовірні результати при розрахунку плівкового охолодження [19].

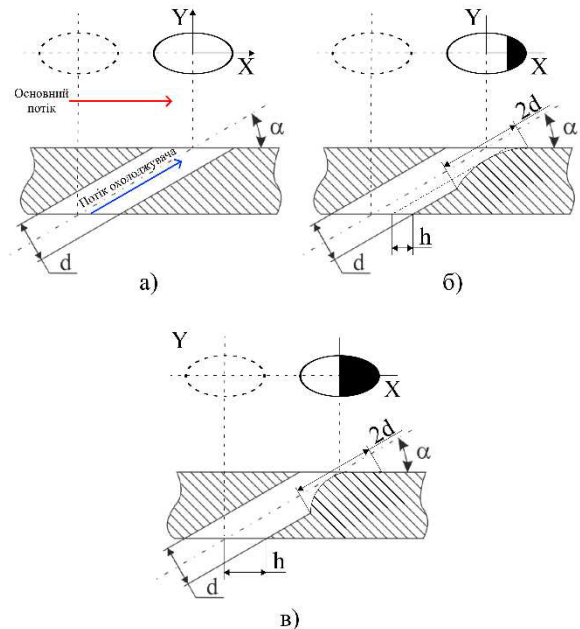
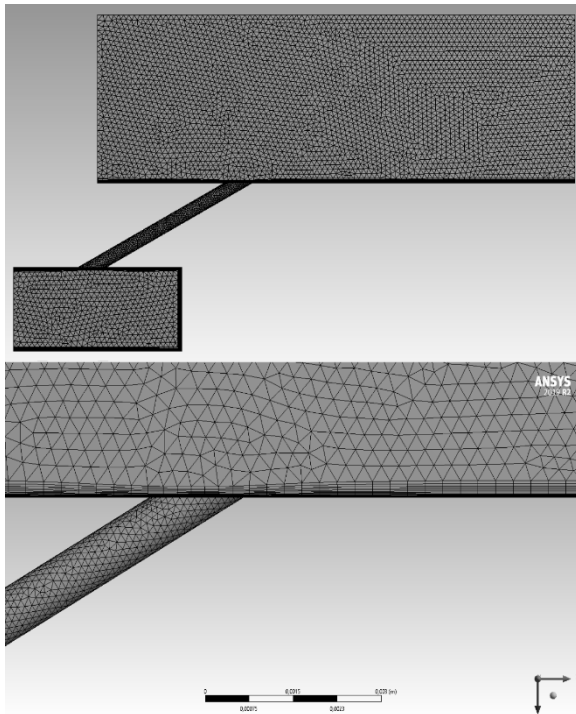


Рис. 3. Геометрія моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через ряд з чотирьох отворів при частковому блокуванні:

$$a - h/d = 0; \quad б - h/d = 0,5; \quad в - h/d = 1,0$$

Fig. 3. Geometry of the film cooling model of a flat surface with coolant blowing through a row of four holes under partial blockage.

$$a - h/d = 0; \quad б - h/d = 0,5; \quad в - h/d = 1,0$$



**Рис. 4. Неструктуровані геометричні сітки для CFD моделювання у поперечному напрямку та в околі ділянки поверхні вдуву охолоджувача (без блокування) [21]**

**Fig. 4. Unstructured geometric meshes for CFD modeling in the transverse direction and in the vicinity of the coolant blowing surface area (without blockage) [21]**

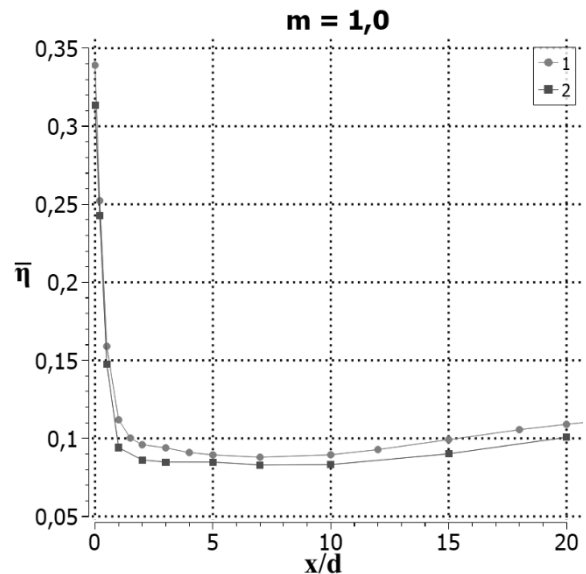
#### Верифікація результатів

На першому етапі було проведено верифікацію результатів розрахунків з даними експериментів для традиційної схеми подачі охолоджувача через один ряд чотирьох похилих отворів при параметрі вдуву  $m = 1,0$  [20, 21]. В розрахунках використовувалась SST модель турбулентності.

Було проведено порівняння залежності середньої в поперечному напрямку адиабатною ефективністю плівкового охолодження по довжині пластини вибраної сітки з експериментальними даними для параметру вдуву  $m = 1,0$  [20, 21].

Для оцінювання похибки розрахованих даних було використано формулу:

$$\varepsilon = \frac{|\bar{\eta}_1 - \bar{\eta}_2|}{\bar{\eta}_1} \cdot 100\% \quad (2)$$



**Рис. 5. Результати верифікації моделі сітки: 1 – розрахунок з використанням сітки 1,11 млн. елементів; 2 – експеримент [20,21]**

**Fig. 5. Mesh model verification results: 1 – calculation using a mesh with 1.11 million elements; 2 – experiment [20,21]**

де  $\bar{\eta}_1$  – експериментальне/розраховане значення середньої ефективності плівкового охолодження,  $\bar{\eta}_2$  – розраховане значення середньої ефективності плівкового охолодження.

Результати показують, що відхилення від результатів [20, 21] становило 9,68%, що є допустимим відхиленням при комп'ютерному моделюванні. Отже, SST модель турбулентності у сукупності з обраною моделлю сітки достатньо точно описують ефективність плівкового охолодження для традиційної конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ).

#### Результати та їх обговорення

##### Ізолінії ефективності плівкового охолодження

В цьому розділі представлені ізолінії розподілу ефективності плівкового охолодження на плоскій поверхні для досліджуваних конфігурацій з блокуванням та без, відповідно до параметрів вдуву  $m = 0,4$  (рис. 6);  $m = 0,6$  (рис. 7);  $m = 0,8$  (рис. 8);  $m = 1,0$  (рис. 9).

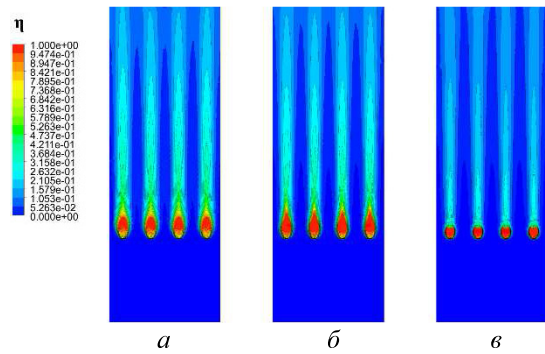
Аналіз ізоліній локальної ефективності плівкового охолодження, представлених на відповідних ілюстраціях, дозволяє зробити низку важливих висновків щодо поведінки системи за різних умов. Зі збільшенням параметра вдуву  $m$ , який характеризує

співвідношення масової витрати охолоджувача до основного потоку, спостерігається поступове зниження ефективності плівкового охолодження. Ця тенденція пояснюється тим, що при вищих значеннях  $m$  швидкість потоку охолоджувача зростає, що може призводити до збільшення кута виходу потоку, в наслідок порушення його прилягання до поверхні та зменшення захисного ефекту плівки.

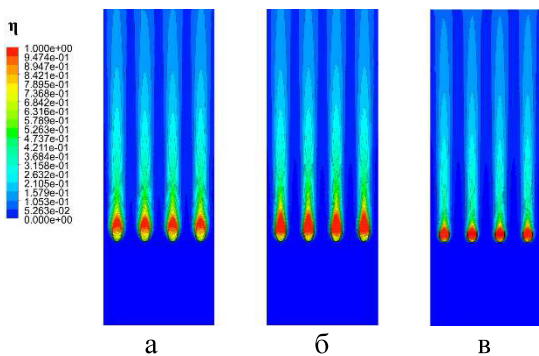
Додатковим фактором, що впливає на ефективність плівкового охолодження, є безрозмірний параметр блокування отворів  $h/d$ . Зі збільшенням  $h/d$  локальна ефективність плівкового охолодження також знижується. Цей ефект зумовлений зміною геометрії виходу охолоджувача: при більшому ступені блокування потік охолоджувача виходить із отворів під більшим кутом відносно поверхні пластини. Як наслідок, виникає відрив потоку від поверхні, що супроводжується турбулентним змішуванням охолоджувача з гарячим основним потоком. Таке змішування значно зменшує здатність охолоджувача ефективно ізолювати поверхню від теплового впливу, що негативно позначається на загальній ефективності системи.

Ще одним важливим аспектом є просторовий розподіл потоку охолоджувача по поверхні пластини, який характеризується вираженою нерівномірністю. Аналіз ізоліній показує наявність чітко виражених локальних максимумів ефективності охолодження вздовж осі розміщення отворів видування охолоджувача, що простежується по всій довжині пластини. Ці мак-

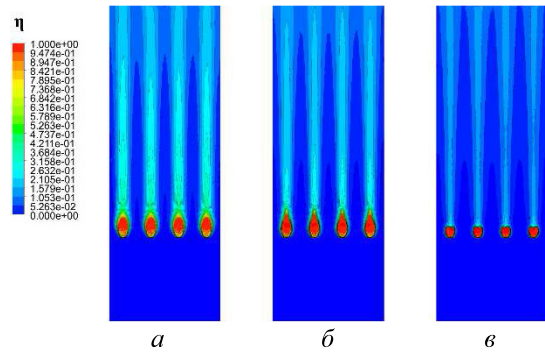
симуми відображають зони, де охолоджувач найбільш інтенсивно контактує з поверхнею, створюючи локальні ділянки ефективного теплозахисту. Натомість у міжотвірних зонах спостерігаються локальні мінімуми ефективності, що свідчить про недостатнє покриття поверхні охолоджувальною плівкою в цих регіонах. Така нерівномірність розподілу підтверджує неоднорідність формування захисної плівки охолоджувача та вказує на обмеження традиційних конфігурацій отворів у забезпеченні рівномірного охолодження.



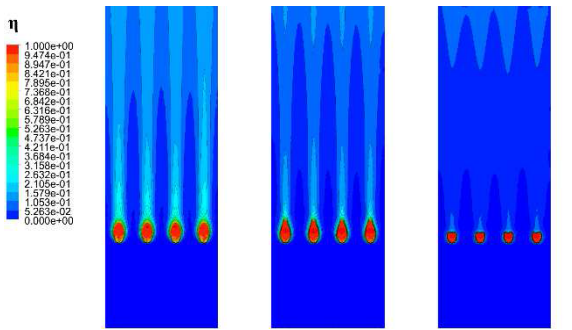
**Рис. 7. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій блокування отворів ( $m = 0,6$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$   
**Fig. 7. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage configurations ( $m = 0.6$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$



**Рис. 6. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій блокування отворів ( $m = 0,4$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$   
**Fig. 6. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage configurations ( $m = 0.4$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$



**Рис. 8. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій блокування отворів ( $m = 0,8$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$   
**Fig. 8. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage configurations ( $m = 0.8$ ):**  
 $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$



**Рис. 9. Ізоліїї локальної ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій блокування отворів ( $m = 1,0$ ):**

$a - h/d = 0$ ;  $b - h/d = 0,5$ ;  $c - h/d = 1,0$

**Fig. 9. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage configurations ( $m = 1.0$ ):**

$a - h/d = 0$ ;  $b - h/d = 0,5$ ;  $c - h/d = 1,0$

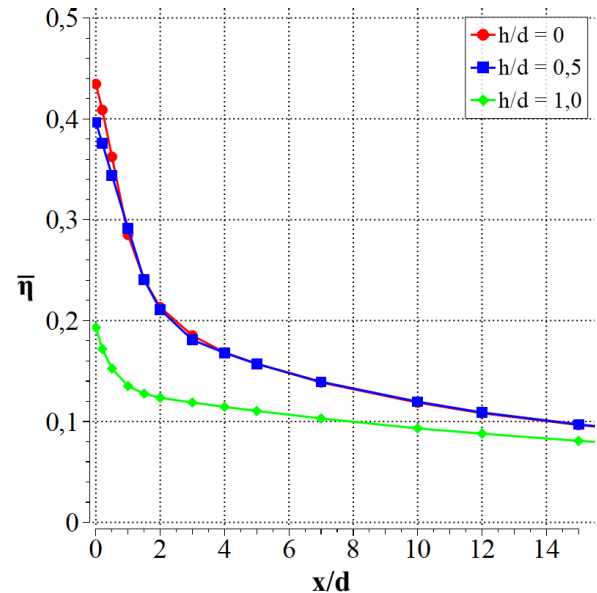
Ще одним важливим аспектом є просторовий розподіл потоку охолоджувача по поверхні пластини, який характеризується вираженою нерівномірністю. Аналіз ізолій показує наявність чітко виражених локальних максимумів ефективності охолодження вздовж осі розміщення отворів вдуву охолоджувача, що простежується по всій довжині пластини. Ці максимуми відображають зони, де охолоджувач найбільш інтенсивно контактує з поверхнею, створюючи локальні ділянки ефективного теплозахисту. Натомість у міжотвірних зонах спостерігаються локальні мінімуми ефективності, що свідчить про недостатнє покриття поверхні охолоджувальною плівкою в цих регіонах. Така нерівномірність розподілу підтверджує неоднорідність формування захисної плівки охолоджувача та вказує на обмеження традиційних конфігурацій отворів у забезпеченні рівномірного охолодження.

#### Порівняння усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження

Для визначення усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження використовується залежність

$$\bar{\eta} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n-1} (\eta_i + \eta_{i+1}) \quad (3)$$

де  $n$  – кількість локальних (місцевих) точок ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямку, прийнятих для усереднення [21].



**Рис. 10. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,4$**

**Fig. 10. Width-averaged film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.4$**

На рисунках 10–13 представлені залежності усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження по ширині пластини для різних значень параметра вдуву  $m$  (0.4, 0.6, 0.8 та 1.0) та ступеня блокування на ділянці  $0 \leq x/d \leq 15$ . Ці графіки дозволяють детально оцінити вплив параметрів вдуву та блокування на ефективність плівкового охолодження.

Як показали результати досліджень робіт [4-7], ділянка  $0 \leq x/d \leq 12$  показує найбільший інтерес для аналізу ефективності плівкового охолодження, так як виходячи за цей діапазон ефективність показує сталі значення.

Аналізуючи наведені нижче графіки, приходимо до висновку, що зі збільшенням параметра вдуву  $m$  від 0.4 до 1.0 усереднена ефективність плівкового охолодження ( $\bar{\eta}$ ) зменшується. Наприклад, при  $m = 0.4$  (рис. 10) максимальна  $\bar{\eta}$  для конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ) на початковій ділянці ( $x/d \approx 0$ ) становить 0.45, тоді як при  $m = 1.0$  (рис. 13) це значення знижується до 0.35, що відповідає зменшенню на 22%. Це пояснюється зростанням швидкості потоку охолоджувача при вищих  $m$ , що спричиняє його відрив від поверхні та інтенсивне змішування з основним потоком, зменшуючи ефективність плівкового охолодження.

Ступінь блокування отворів ( $h/d$ ) має значний вплив на ефективність. Для всіх значень  $m$  конфігурація без блокування ( $h/d = 0$ ) забезпечує най-

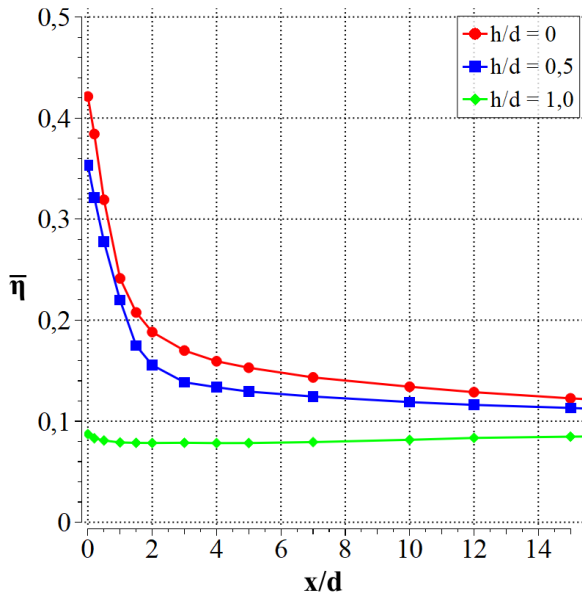


Рис. 11. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,6$

Fig. 11. Width-averaged film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.6$

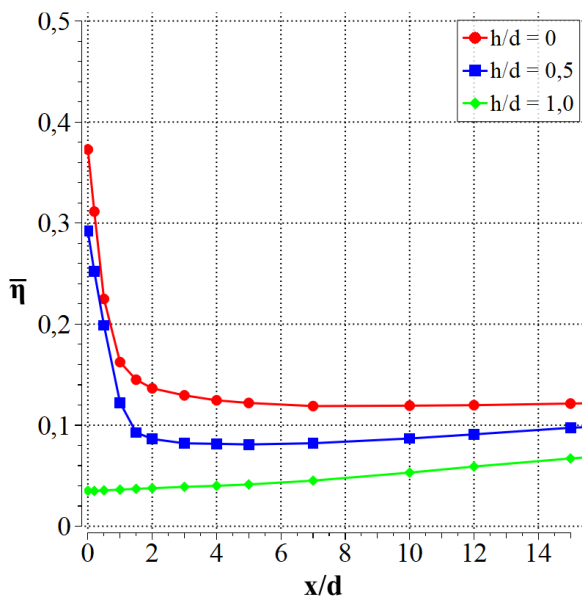


Рис. 12. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,8$

Fig. 12. Width-averaged film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.8$

вищу  $\bar{\eta}$ . При  $m = 0.4$  (рис. 10) на початковій ділянці ( $0 \leq x/d \leq 15$ ) порівняно з  $h/d = 0$  для  $h/d = 0.5$  ефективність знижується на 11% (з 0.45 до 0.40), а для  $h/d = 1.0$  – на 24% (до 0.34) порівняно з  $h/d = 0$ . При  $m = 0.8$  (рис. 12) для  $h/d = 1.0$   $\bar{\eta}$  падає на 28% (з 0.39 до 0.28) на тій же ділянці. Це зумовлено зміною кута виходу охолоджувача при блокуванні, що посилює відрив потоку та його змішування з основним потоком.

На всіх графіках спостерігається різке зниження на початковій ділянці ( $0 \leq x/d \leq 2$ ), після чого значення стабілізуються. Наприклад, при  $m = 0.6$  (рис. 11) для  $h/d = 0$  величина  $\bar{\eta}$  падає з 0.43 до 0.15 (на 65%) на відстані  $x/d = 2$ , а для  $h/d = 1.0$  – з 0.33 до 0.12 (на 64%). На віддалених ділянках ( $x/d \geq 10$ ) різниця між конфігураціями зменшується: при  $m = 0.8$  (рис. 12) для  $h/d = 0$   $\bar{\eta} = 0.12$ , а для  $h/d = 1.0$  – 0.09, що становить зниження на 25%.

При  $m = 1.0$  (рис. 13) ефект відриву стає особливо вираженим: для  $h/d = 1.0$  величина  $\bar{\eta}$  при  $x/d \approx 0$  становить 0.25, що на 29% нижче, ніж для  $h/d = 0$  (0.35). На віддалених ділянках ( $x/d \geq 10$ ) ефективність для всіх конфігурацій вирівнюється на рівні 0.08 – 0.10, що вказує на значне погіршення теплозахисту через частковий відрив потоку.

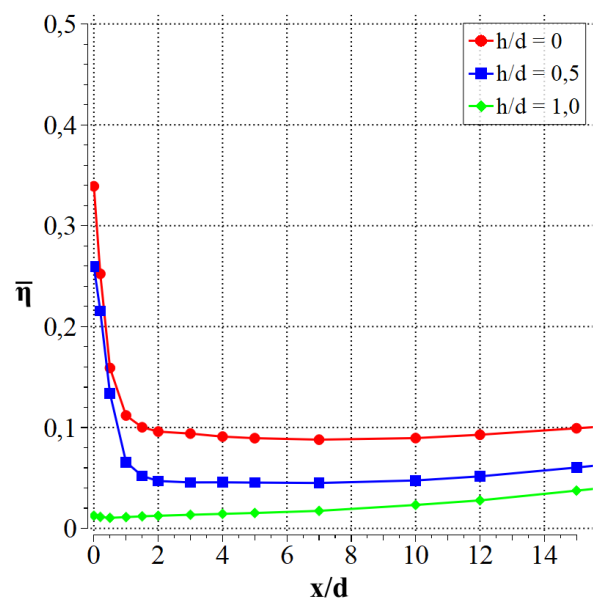


Рис. 13. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 1,0$

Fig. 13. Width-averaged film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 1.0$

### Порівняння усередненої по площі пластини ефективності плівкового охолодження

На рис. 14 представлено залежність усередненої по всій площі досліджуваної пластини ефективності плівкового охолодження ( $\bar{\eta}$ ), від параметра вдуву ( $m$ ) (у діапазоні від 0.4 до 1.0) для різних ступенів блокування отворів ( $h/d = 0, 0.5, 1.0$ ). Усереднена ефективність визначалася за виразом:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{\eta}_k \quad (4)$$

де  $\bar{\eta}_k$  - усереднена ефективність плівкового охолодження по бічній поверхні за номером поперечного перерізу  $k$ ;  $k$  - кількість поперечних перерізів взятих вздовж довжини каналу.

Графік наведений вище демонструє, що зі збільшенням  $m$  від 0.4 до 1.0 величина  $\bar{\eta}$  знижується: для конфігурації без блокування ефективність падає з 0.18 до 0.14 (на 22%), для конфігурації з блокуванням ( $h/d = 0.5$ ) – з 0.17 до 0.12 (на 29%), а для конфігурації з блокуванням ( $h/d = 1.0$ ) – з 0.11 до 0.07 (на 36%). Ступінь блокування суттєво впливає: при  $m = 0.4$  для  $h/d = 0.5$  величина  $\bar{\eta}$  знижується на 6% (до 0.17), а

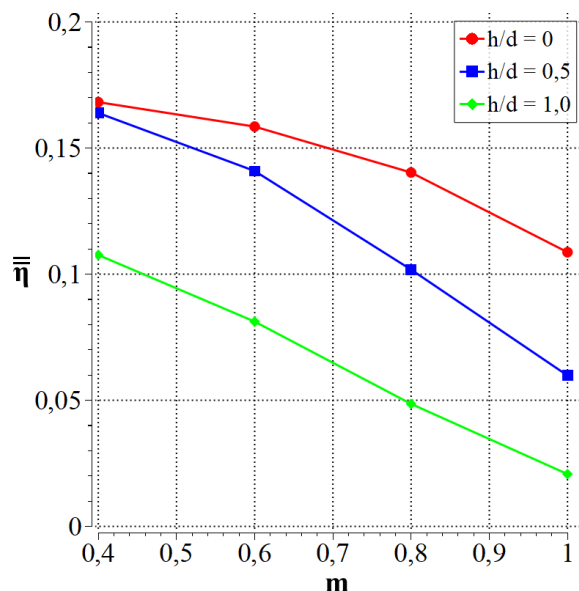


Рис. 14. Усереднена по всій площі ефективності плівкового охолодження за різних значень параметру вдуву  $m$

Fig. 14. Area-averaged film cooling effectiveness for different blowing parameter values  $m$

Табл. 1. Результати усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження  
Table 1. Results of area-averaged film cooling effectiveness

Конфігурація	$\bar{\eta}$ , %
$h/d = 0$	14,4
$h/d = 0.5$	11,7
$h/d = 1.0$	6,5

для  $h/d = 1.0$  – на 39% (до 0.11) порівняно з  $h/d = 0$ ; при  $m = 1.0$  зниження становить 14% (до 0.12) і 50% (до 0.07) відповідно. Загалом, найвища ефективність спостерігається для моделі без блокування, тоді як максимальне блокування призводить до найбільшого зниження  $\bar{\eta}$ , що пояснюється відривом потоку охолоджувача та його змішуванням із основним потоком через більший кут виходу при блокуванні.

### Висновки

Результати дослідження свідчать, що зі збільшенням ступеня блокування ( $h/d$ ) отворів ефективність плівкового охолодження поверхні після отворів виду-ву охолоджувача суттєво знижується, що зумовлено відривом потоку охолоджувача на початковій ділянці. Це явище пояснюється більшим кутом виходу охолоджувача при зростанні ступеня блокування, що призводить до інтенсивного змішування струменя охолоджувача з основним потоком і, відповідно, до погіршення теплозахисних характеристик. Усереднена по всій площі пластини ефективність плівкового охолодження зменшується на 2.7% при  $h/d = 0.5$  та на 7.9% при  $h/d = 1.0$  порівняно з конфігурацією без блокування. Крім того, зі зростанням параметра вдуву  $m$  зберігається нерівномірність розподілу плівки охолоджувача, що пов'язано з геометричними особливостями отворів та їхньою взаємодією з потоком.

Дослідження підкреслюють значний вплив забруднення отворів на ефективність плівкового охолодження, що є критичним фактором для систем теплозахисту лопаток газових турбін.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Xiaohu Chen, Yuzhang Wang, Yun Long, Shilie Weng, Effect of particle deposition on film cooling from fan-shaped holes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 181, 2021, 122028, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.heatmasstransfer.2021.122028>.

2. *Goutam Chandra Gualco*, High-Temperature Materials for Gas Turbine Applications, ResearchGate Publication, 2023, 373049846, ISBN 978-93-94166-01-1, [https://www.researchgate.net/publication/373049846\\_High-Temperature\\_Materials\\_for\\_Gas\\_Turbine\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/373049846_High-Temperature_Materials_for_Gas_Turbine_Applications).
3. *Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D.*, Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations, *Thermophysics and Aeromechanics*, Volume 24, No. 5, 2017, pp. 751–757, ISSN 0869-8643, <https://doi.org/10.1134/S086986431705011X>.
4. *Chen, X.; Wang, Y.; Long, Y.; Weng, S.*, Effect of Partial Blockage on Flow and Heat Transfer of Film Cooling with Cylindrical and Fan-Shaped Holes, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 164, 2021, 106866, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866>.
5. *Kewen Xu, Kun He, Xin Yan*, Effects of cooling hole blockage on heat transfer and film cooling effectiveness of gas turbine squealer tip, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 112, 2025, 109678, ISSN 0142-727X, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109678>.
6. *Bai, B.; Chen, X.; Zhang, H.; Li, Z.; Li, J.; Mao, S.; Ng, W. F.*, Turbine Nozzle Guide Vane Endwall Film Cooling and Vane Phantom Cooling Performances at Various Blocked Film Hole Configurations, *Journal of Turbomachinery*, Volume 147, Issue 10, 2025, 101003, ISSN 0889-504X, <https://doi.org/10.1115/1.4067932>.
7. *Liwei Ma, Ran Yao, Xinyu Liu, Jianhua Wang, Wei Song, Hang Su*, Statistical evaluation on cooling unsteadiness level for a cylindrical film-hole influenced by partial blockage under pulsed mainstream, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 155, 2024, 107496, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107496>.
8. *Khalatov A. A., Panchenko, N.A., Borisov, I.I., Severin V.V.*, Numerical Simulation of Film Cooling with a Coolant Supplied Through Holes in a Trench, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Volume 90, 2017, pp. 1-7, ISSN 1062-0125, <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1610-1>.
9. *Hylton, L. D.; Mihelc, M. S.; Turner, E. R.; Nealy, D. A.; York, R. E.*, Analytical and Experimental Evaluation of the Heat Transfer Distribution Over the Surfaces of Turbine Vanes, NASA Contractor Report, 1983, NASA-CR-168015, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830014986>.
10. *Lee, S., Hwang, W., Yee, K.*, Robust design optimization of a turbine blade film cooling hole affected by roughness and blockage, *Int. J. Therm. Sci.*, Volume 133, 2018, pp. 216–229, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.029>.
11. *Bunker, R. S.*, Film Cooling Technology for Gas Turbines: A Review, *Journal of Turbomachinery*, Volume 142, Issue 8, 2020, 081004, ISSN 0889-504X, <https://doi.org/10.1115/1.4046723>.
12. *Liu, Z., Zhang, F., Liu, Z., Diao, W.*, An experimental study of the effects of different transverse trenches on deposition on a turbine vane with film-cooling at high temperature, *Aerosp. Sci. Technol.*, Volume 107, 2020, 106340, ISSN 1270-9638, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106340>.
13. *Goldstein, R. J.*, Advances in Film Cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 138, 2019, pp. 1215-1228, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.097>.
14. *Walters, D. K.; Leylek, J. H.*, A Detailed Analysis of Film Cooling Physics, *Journal of Fluids Engineering*, Volume 143, Issue 2, 2021, 021401, ISSN 0098-2202, <https://doi.org/10.1115/1.4048412>.
15. *Zhang, H.; Jiang, Y.; Chen, C.; He, Y.*, Simulation of particle deposition on high temperature turbine film cooling blade surface with dynamic mesh morphing, *ScienceDirect*, 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931023006783>.
16. *Sun, W.; Zheng, Y.; Gao, Q.; Zhang, J.*, Numerical simulations on film cooling performance of turbine blade before and after particles deposition, *ScienceDirect*, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193322001234>.
17. *Shrinivas, S. S.; Tafti, D. K.*, Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition in turbine gas hotpath, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 32, 2019, pp. 201-211, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.12.004>.
18. *Artem Khalatov, Igor Borisov, Sergiy Kobzar, Glib Kovalenko, Tetyana Donyk, Oksana Shikhabutinova*, Heat Transfer and Hydrodynamics in Centrifugal Fields. Volume 11: Vortex Technologies of Thermogasdynamics, Lira LTD, Dnipro, Ukraine, 2024, P.119, ISBN 978-966-981-979-6, DOI: 10.23877/978-966-981-979-6.
19. *Li, X.; Zhang, Y.*, Numerical Investigation of Film Cooling Performance Using RANS with SST Turbulence Model on a Flat Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 149, 2020, 106672, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.106672>.
20. *Khalatov Artem, Igor Borysov, Yuri Dashevskyy, Sergey Reznik*, Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields: monograph, Kyiv: NTUU «KPI», Politechnika, 2016, Volume 10: Advanced film cooling schemes, 238 p., ISBN 978-966-981-979-6.
21. *Danylov M. A., Donyk T. V.*, Effect of Coolant Injection Hole Blockage on Film Cooling Efficiency, *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment: Collection of Scientific Papers*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, No. 4 (16), pp. 45-50, ISSN 2078-774X, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.04.07>.

## FILM COOLING EFFECTIVENESS UNDER CONDITIONS OF CONTAMINATION OF DISCRETE COOLER BLOW HOLES

Khalatov A.A.<sup>1</sup>, Danylov M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, Ukraine, 03057, Professor, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>.*

<sup>2</sup>*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, Ukraine, 03057, lead engineer, e-mail: danylovmykhailo24@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0265-1286>*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.1>

Modern gas turbine units (GTUs) operate under extreme conditions, with inlet gas temperatures reaching up to 1750 °C, while the heat-resistant materials of turbine blades are limited to a thermal resistance of 1000–1100 °C. This discrepancy necessitates advanced cooling techniques to ensure blade durability and reliability. Film cooling, achieved by injecting coolant air through small holes to form a protective layer on the blade surface, is a widely adopted method. However, during GTU operation, particle deposition (e.g., CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>) can cause partial blockage of coolant supply holes, significantly impacting film cooling effectiveness and heat transfer intensification, which underscores the importance of studying this phenomenon.

*The Purpose of the Work.* This study aims to investigate the effect of partial blockage of coolant supply holes on film cooling effectiveness under varying blowing ratios, with a particular focus on the transverse distribution of cooling effectiveness. By modeling a system with four injection holes, the research seeks to analyze the spatial non-uniformity of coolant distribution and its impact on cooling performance at different blockage degrees.

*Research Methods.* The investigation was conducted using numerical simulations in ANSYS CFX 2019 R2. The blockage degree was characterized by the dimensionless ratio  $h/d$ , where ( $h$ ) is the transverse blockage size and ( $d$ ) is the hole diameter (0.8 mm). Three configurations were modeled: a baseline without blockage ( $h/d = 0$ ), and two with partial blockages ( $h/d = 0.5$  and  $h/d = 1.0$ ). A hybrid unstructured mesh with 434,000 nodes and 1.1 million

elements was employed, using the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the SST turbulence model for closure.

*Results and Conclusions.* The results reveal that increasing the blockage degree ( $h/d$ ) significantly reduces film cooling effectiveness due to flow detachment caused by a larger coolant injection angle, which enhances mixing with the mainstream flow. Specifically, the average film cooling effectiveness decreases by 2.7% at  $h/d = 0.5$  and by 7.9% at  $h/d = 1.0$  compared to the unblocked configuration. Additionally, as the blowing ratio ( $m$ ) increases from 0.4 to 1.0, the effectiveness drops further, with a maximum reduction of 22% for  $h/d = 0$ , 29% for  $h/d = 0.5$ , and 36% for  $h/d = 1.0$ . Transverse non-uniformity in coolant distribution persists across all blowing ratios, with local effectiveness maxima along the hole axes and minima in inter-hole regions, highlighting the role of hole geometry in cooling performance. These findings emphasize the critical impact of hole contamination on film cooling effectiveness in gas turbine blade systems, indicating the need for strategies to mitigate blockage effects, such as exploring alternative hole designs or materials resistant to particle deposition, to improve cooling uniformity and thermal protection.

References 21, figures 14, tables 1.

**Key words:** computer simulation, film cooling effectiveness, hole contamination, blocking parameter.

1. Xiaohu Chen, Yuzhang Wang, Yun Long, Shilie Weng, Effect of particle deposition on film cooling from fan-shaped holes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 181, 2021, 122028, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122028>.

2. Goutam Chandra Gualco, High-Temperature Materials for Gas Turbine Applications, ResearchGate Publication, 2023, 373049846, ISBN 978-93-94166-01-1, [https://www.researchgate.net/publication/373049846\\_High-Temperature\\_Materials\\_for\\_Gas\\_Turbine\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/373049846_High-Temperature_Materials_for_Gas_Turbine_Applications).

3. Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D., Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations, *Thermophysics and Aeromechanics*, Volume 24, No. 5, 2017, pp. 751–757, ISSN 0869-8643, <https://doi.org/10.1134/S086986431705011X>. (in Ukr.).

4. Chen, X.; Wang, Y.; Long, Y.; Weng, S., Effect of Partial Blockage on Flow and Heat Transfer of Film Cooling with Cylindrical and Fan-Shaped Holes, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 164, 2021, 106866, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866>.

5. *Kewen Xu, Kun He, Xin Yan*, Effects of cooling hole blockage on heat transfer and film cooling effectiveness of gas turbine squealer tip, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 112, 2025, 109678, ISSN 0142-727X, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109678>.
6. *Bai, B.; Chen, X.; Zhang, H.; Li, Z.; Li, J.; Mao, S.; Ng, W. F.*, Turbine Nozzle Guide Vane Endwall Film Cooling and Vane Phantom Cooling Performances at Various Blocked Film Hole Configurations, *Journal of Turbomachinery*, Volume 147, Issue 10, 2025, 101003, ISSN 0889-504X, <https://doi.org/10.1115/1.4067932>.
7. *Liwei Ma, Ran Yao, Xinyu Liu, Jianhua Wang, Wei Song, Hang Su*, Statistical evaluation on cooling unsteadiness level for a cylindrical film-hole influenced by partial blockage under pulsed mainstream, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 155, 2024, 107496, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107496>.
8. *Khalatov A. A., Panchenko, N.A., Borisov, I.I., Severin V.V.*, Numerical Simulation of Film Cooling with a Coolant Supplied Through Holes in a Trench, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Volume 90, 2017, pp. 1-7, ISSN 1062-0125, <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1610-1>. (in Ukr.).
9. *Hylton, L. D.; Mihelc, M. S.; Turner, E. R.; Nealy, D. A.; York, R. E.*, Analytical and Experimental Evaluation of the Heat Transfer Distribution Over the Surfaces of Turbine Vanes, NASA Contractor Report, 1983, NASA-CR-168015, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830014986>.
10. *Lee, S., Hwang, W., Yee, K.*, Robust design optimization of a turbine blade film cooling hole affected by roughness and blockage, *Int. J. Therm. Sci.*, Volume 133, 2018, pp. 216–229, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.029>.
11. *Bunker, R. S.*, Film Cooling Technology for Gas Turbines: A Review, *Journal of Turbomachinery*, Volume 142, Issue 8, 2020, 081004, ISSN 0889-504X, <https://doi.org/10.1115/1.4046723>.
12. *Liu, Z., Zhang, F., Liu, Z., Diao, W.*, An experimental study of the effects of different transverse trenches on deposition on a turbine vane with film-cooling at high temperature, *Aerosp. Sci. Technol.*, Volume 107, 2020, 106340, ISSN 1270-9638, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106340>.
13. *Goldstein, R. J.*, Advances in Film Cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 138, 2019, pp. 1215-1228, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.097>.
14. *Walters, D. K.; Leylek, J. H.*, A Detailed Analysis of Film Cooling Physics, *Journal of Fluids Engineering*, Volume 143, Issue 2, 2021, 021401, ISSN 0098-2202, <https://doi.org/10.1115/1.4048412>.
15. *Zhang, H.; Jiang, Y.; Chen, C.; He, Y.*, Simulation of particle deposition on high temperature turbine film cooling blade surface with dynamic mesh morphing, *ScienceDirect*, 2023, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931023006783>.
16. *Sun, W.; Zheng, Y.; Gao, Q.; Zhang, J.*, Numerical simulations on film cooling performance of turbine blade before and after particles deposition, *ScienceDirect*, 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193322001234>.
17. *Shrinivas, S. S.; Tafti, D. K.*, Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition in turbine gas hotpath, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 32, 2019, pp. 201-211, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.12.004>.
18. *Artem Khalatov, Igor Borisov, Sergiy Kobzar, Glib Kovalenko, Tetyana Donyk, Oksana Shikhabutina*, Heat Transfer and Hydrodynamics in Centrifugal Fields. Volume 11: Vortex Technologies of Thermogasdynamics, Lira LTD, Dnipro, Ukraine, 2024, P.119, ISBN 978-966-981-979-6, DOI: 10.23877/978-966-981-979-6. (in Ukr.).
19. *Li, X.; Zhang, Y.*, Numerical Investigation of Film Cooling Performance Using RANS with SST Turbulence Model on a Flat Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 149, 2020, 106672, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.106672>.
20. *Khalatov Artem, Igor Borysov, Yuri Dashevskyy, Sergey Reznik*, Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields: monograph, Kyiv: NTUU «KPI», Politechnika, 2016, Volume 10: Advanced film cooling schemes, 238 p., ISBN 978-966-981-979-6. (in Rus.).
21. *Danylov M. A., Donyk T. V.*, Effect of Coolant Injection Hole Blockage on Film Cooling Efficiency, *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment: Collection of Scientific Papers*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, No. 4 (16), pp. 45-50, ISSN 2078-774X, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.04.07>. (in Ukr.).

Отримано 09.04.2025  
Received 09.04.2025

Прийнято до друку 10.05.2025  
Accepted for publication 10.05.2025