

УДК 536.24:621.438

## ВПЛИВ НЕІЗОТЕРМІЧНОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ЧАСТКОВОМУ БЛОКУВАННІ ОТВОРІВ ВИДУВУ ОХОЛОДЖУВАЧА

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

<sup>1</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>.

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор кафедри прикладної фізики НН ФТІ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>.

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.1>

У статті досліджено вплив неізотермічності потоку на ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні при частковому блокуванні отворів видуву охолоджувача. Дослідження виконано за допомогою чисельного моделювання в комерційному пакеті ANSYS CFX 2019 R2 із застосуванням SST-моделі турбулентності для умов з параметром неізотермічності  $R_t = 1.8$ , що відповідає експлуатаційним режимам транспортним та енергетичних ГТУ (температура основного потоку 1100 °С, охолоджувача 500 °С). Розглянуто діапазон параметра вдуву від 0.4 до 1.0, характерний для роботи турбіни на частковому навантаженні, для трьох конфігурацій: без блокування та з частковим блокуванням 25% та 50% поперечного перерізу отворів видуву охолоджувача. Встановлено, що в умовах високої неізотермічності ( $R_t = 1.8$ ) абсолютні значення ефективності плівкового охолодження є вдвічі вищими порівняно з низькотемпературними умовами ( $R_t = 1.2$ ): при  $m = 0.4$  ефективність зростає з 16.8% ( $R_t = 1.2$ ) до 33.6% ( $R_t = 1.8$ ) для конфігурації без блокування. Блокування отворів знижує ефективність на 13.7% при  $h/d = 0.5$  та на 28.6% при  $h/d = 1.0$  відносно базової конфігурації без блокування при  $R_t = 1.8$ , що пов'язано з підвищенням швидкості вдуву та зміною кута виходу потоку. Поперечна нерівномірність розподілу плівки зберігається для всіх конфігурацій.

The article investigates the effect of flow non-isothermality on film cooling effectiveness of a flat surface under partial blockage of coolant injection holes. The study was performed using numerical simulations in the commercial package ANSYS CFX 2019 R2 with the SST turbulence model for conditions with a non-isothermality parameter  $R_t = 1.8$ , corresponding to operational regimes of transport and power gas turbine units (mainstream temperature 1100 °C, coolant temperature 500 °C). The analysis considered a blowing ratio range from 0.4 to 1.0, characteristic of partial-load turbine operation, for three configurations: no blockage and partial blockage of 25% and 50% of the coolant injection hole cross-section. It was established that under high non-isothermality conditions ( $R_t = 1.8$ ), the absolute values of film cooling effectiveness are twice as high compared to low-temperature conditions ( $R_t = 1.2$ ): at  $m = 0.4$ , the effectiveness increases from 16.8% ( $R_t = 1.2$ ) to 33.6% ( $R_t = 1.8$ ) for the configuration without blockage. Hole blockage reduces effectiveness by 13.7% for  $h/d = 0.5$  and by 28.6% for  $h/d = 1.0$  relative to the baseline configuration without blockage at  $R_t = 1.8$ , which is attributed to increased jet velocity and changes in the jet exit angle. Transverse non-uniformity of the film distribution persists across all configurations.

Бібл. 24, рис. 13, табл. 1.

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

### Вступ

Ефективність плівкового охолодження лопаток газових турбін суттєво залежить від температурних умов експлуатації, що характеризуються параметром неізотермічності  $R_t = T_f/T_2$ , де  $T_f$  – температура основного потоку,  $T_2$  – температура охолоджувача. Для реальних умов експлуатації газотурбінних установок (ГТУ), зокрема транспортного та військового призначення, характерні значення при температурах газового потоку 1700–1750 °С [1] та температурі охолоджувача 500–600 °С. Жаростійкі матеріали лопаток турбін, такі як нікелеві суперсплави, мають граничну термостійкість на рівні 1000–1100 °С [2], що вимагає

використання ефективних методів охолодження. Це істотно перевищує умови більшості модельних випробувань, де  $R_t$  зазвичай не перевищує 1.2 [3], що створює значну невизначеність при екстраполяції експериментальних даних на реальні умови роботи турбіни.

Важливим аспектом є режими роботи турбіни на частковому навантаженні, що характеризуються зниженими параметрами вдуву охолоджувача ( $m = 0.4–1.0$ ) та ККД. Такі режими типові для експлуатації ГТУ при неповному навантаженні, коли двигун працює не на максимальній потужності. При цьому зменшення витрати охолоджувача може призводити до зміни структури течії та перерозподілу теплозахисної плівки, що

вимагає детального вивчення цих режимів з урахуванням реальних температурних умов.

Додатковим фактором, що впливає на ефективність охолодження лопаток в реальних (в тому числі бойових) умовах, є часткове блокування отворів видуву охолоджувача внаслідок осадження частинок типу  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  [4]. Під час роботи в умовах пустельних та степових регіонів частинки проходять через компресор, дрібняться та нагріваються, після чого в зоні високих температур можуть переходити у розм'якшений стан, формуючи відкладення на внутрішніх поверхнях каналів охолодження [5]. Дослідження показують, що навіть за 50–200 годин експлуатації може відбуватися накопичення відкладень, достатнє для часткового перекриття прохідного перерізу отворів [4, 6].

Більшість досліджень плівкового охолодження виконано для модельних умов ( $R_t \approx 1.2$ ) [4, 7-10], не розглядаючи комбінований вплив високої неізотермічності та блокування отворів [11-14]. Хоча робота [8] показала зниження ефективності плівкового охолодження до 39.4% при блокуванні, вплив температурного фактора залишається недостатньо вивченим. Дослідження [15-17] підтверджують, що частинки 2-20 мкм формують відкладення переважно на передній кромці та тисковій стороні лопатки через інерційні зіткнення, причому температура поверхні суттєво впливає на товщину відкладень.

Метою поточної роботи є чисельне дослідження впливу неізотермічності потоку ( $R_t = 1.8$ ) на ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні при частковому блокуванні отворів видуву охолоджувача в діапазоні параметрів вдуву  $m = 0.4-1.0$ , характерному для роботи турбіни на частковій навантаженні. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу з модельними умовами ( $R_t = 1.2$ ) та оцінці поперечної нерівномірності формування охолоджувальної плівки у чотириотворній конфігурації.

### Матеріали і методи досліджень

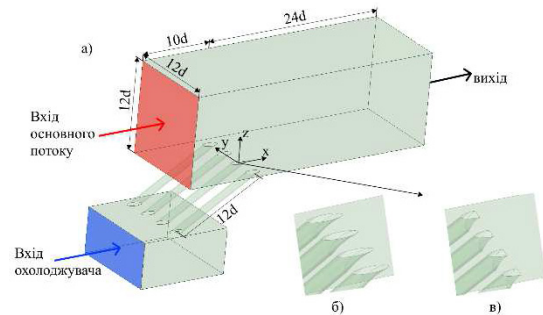
Об'єктом дослідження є система плівкового охолодження плоскої поверхні з одним рядом похилих круглих отворів для видуву охолоджувача. Створено три геометричні конфігурації: конфігурація без блокування, а також дві конфігурації з частковим блокуванням 25% та 50% перерізу отвору видуву охолоджувача (рис. 1).

Ступінь блокування характеризувався безрозмірним параметром  $h/d$ , де  $h$  – максимальна висота поперечного перекриття, а  $d$  – діаметр отвору. Згідно з експе-

риментальними та чисельними спостереженнями, подібні значення блокування відповідають характерним конфігураціям забруднення, наведеним у роботах [4, 8–10].

Геометричні розміри моделі ґрунтувалися на типових параметрах систем охолодження турбінних лопаток [19]. Вихідний діаметр отвору становив  $10d$ , поперечний крок  $12d$  а кут нахилу отворів відносно поверхні –  $30^\circ$ .

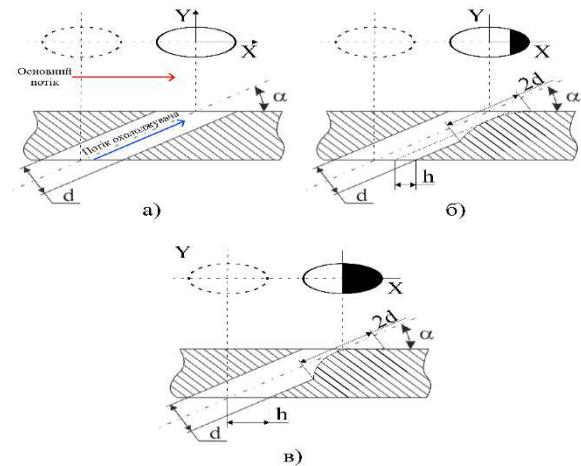
Тривимірні моделі зі змінною геометрією блокування були створені у модулі ANSYS Geometry (рис. 2).



**Рис. 1. Геометрична модель часткового блокування отворів видуву охолоджувача.**

**Fig. 1. Geometric model of partial blockage of coolant blowing holes:**

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



**Рис. 2. Геометрія моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при видуві охолоджувача через одиночний ряд з чотирьох отворів при частковому блокуванні: a –  $h/d = 0$ ; б –  $h/d = 0,5$ ; в –  $h/d = 1,0$  [7]**

**Fig. 2. Geometry of the film cooling model of a flat surface with coolant blowing through a single row of four holes under partial blockage.**

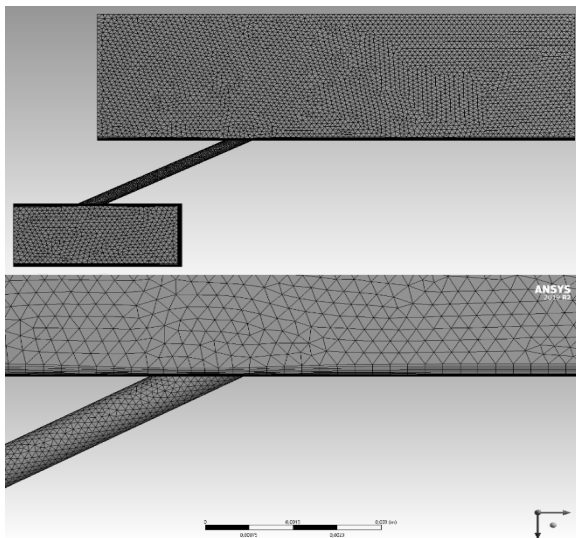
$$a - h/d = 0; \quad б - h/d = 0,5; \quad в - h/d = 1,0 [7]$$

Потік охолоджувача подавався з об'єму-плєнуму, після чого випускався через похилі отвори на зовнішню площину. Така постановка дозволяє адекватно змоделювати реальні умови течії всередині лопатки та на її зовнішній поверхні.

Зважаючи на складний характер взаємодії потоків охолоджувача з основним потоком у зоні видуву, у роботі застосовано чисельний підхід, який дозволяє отримати детальну картину гідродинаміки та теплообміну в умовах зміненої геометрії отворів. Моделювання виконано у програмному комплексі ANSYS CFX 2019 R2, що широко застосовується для аналізу плівкового охолодження та підтвердив свою надійність у численних дослідженнях [20, 21].

Для дискретизації області застосовано гібридну неструктуровану сітку з тетраедричними елементами в основному потоці та призматичними шарами поблизу твердої поверхні (рис. 3). Подібний підхід забезпечує достатню точність у зоні інтенсивних градієнтів температури та швидкості. Кількість елементів для базової конфігурації становила близько 1.1 млн, що відповідає рекомендаціям для задач плівкового охолодження [20, 7].

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



**Рис. 3. Неструктуровані геометричні сітки для CFD моделювання у поперечному напрямку та в околі ділянки поверхні видуву охолоджувача (без блокування) [7]**

**Fig. 3. Unstructured geometric meshes for CFD modeling in the transverse direction and in the vicinity of the coolant blowing surface area (without blockage) [7]**

Швидкість основного потоку становить 400 м/с, що відповідає реальним умовам обтікання лопаток ГТУ, температура газу – 1100 °С, температура вторинного потоку – 500 °С. Інтенсивність турбулентності основного потоку задавалась рівною 1%.

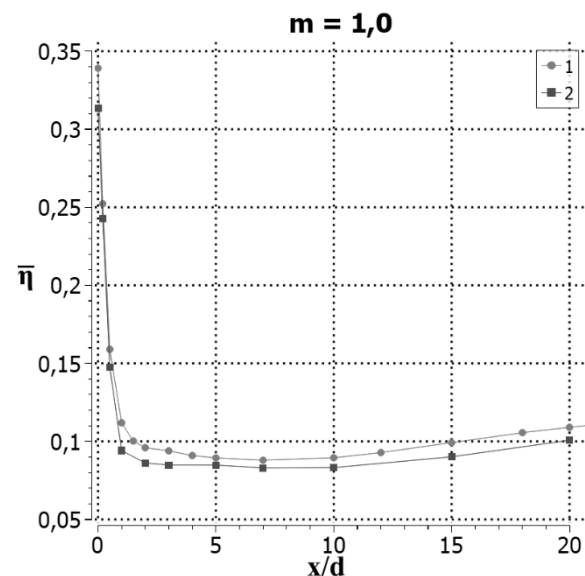
Тверді границі розрахункової області були задані для адіабатної стінки ( $\delta Q = 0$ ). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії [7].

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 [20].

### Верифікація результатів

Було проведено порівняння залежності середньої в поперечному напрямку адіабатною ефективністю плівкового охолодження по довжині пластини вибраної сітки з експериментальними даними для параметру вдуву  $m = 1,0$  [21, 6]. В розрахунках використовувалась SST модель турбулентності.

Результати показують, що відхилення від результатів [22, 7] становило 9,68%, що є допустимим відхиленням при комп'ютерному моделюванні. Отже, SST модель



**Рис. 4. Результати верифікації сітки: 1 – розрахунок з використанням сітки 1,11 млн. елементів; 2 – експеримент [22, 7]**

**Fig. 4. Mesh verification results: 1 – calculation using a mesh with 1.11 million elements; 2 – experiment [22, 7]**

турбулентності у сукупності з обраною моделлю сітки достатньо точно описують ефективність плівкового охолодження для традиційної конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ). [7]

**Результати та їх обговорення**

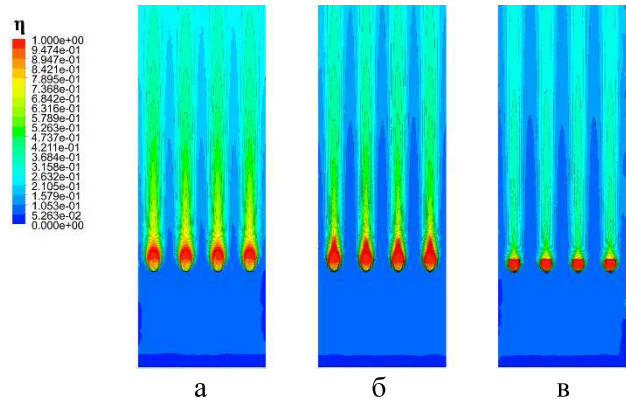
**Ізолінії ефективності плівкового охолодження**

На рисунках 5–8 наведено поля розподілу локальної ефективності плівкового охолодження на досліджуваній поверхні для всіх розглянутих конфігурацій при параметрах вдуву  $m = 0,4$  (рис. 5);  $m = 0,6$  (рис. 6);  $m = 0,8$  (рис. 7);  $m = 1,0$  (рис. 8). Розрахунки виконано для умов, що наближені до реальних експлуатаційних параметрів ( $R_t = 1.8$ ) газотурбінних установок: температура основного потоку становила  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , охолоджувача –  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Аналіз полів локальної ефективності показує, що характер розподілу охолоджувача зберігає якісні закономірності, характерні для плівкового охолодження з дискретною подачею. При цьому абсолютні значення ефективності виявляються вищими порівняно з модельними умовами ( $R_t = 1.2$ ) [7] завдяки більшій різниці температур між основним потоком і охолоджувачем, що забезпечує більш інтенсивніший теплозахист поверхні.

Зростання параметру вдуву  $m$  знижує ефективність через збільшення імпульсу потоку, що викликає відрив струменя та інтенсивне турбулентне перемішування.

Вплив параметра блокування  $h/d$  на ефективність охолодження є суттєвим. Збільшення ступеня блокуван-

ня призводить до зміни траєкторії руху охолоджувача: потік виходить із отворів під більшим кутом нахилу до поверхні. Це викликає раніше відокремлення струменя від стінки та його інтенсивніше змішування з гарячим газом. Результатом є зниження локальних значень ефективності по всій довжині досліджуваної ділянки. Найбільш виражений вплив блокування спостерігається в зоні безпосередньо за отворами видуву, де формуються початкові ділянки охолоджувальної плівки.

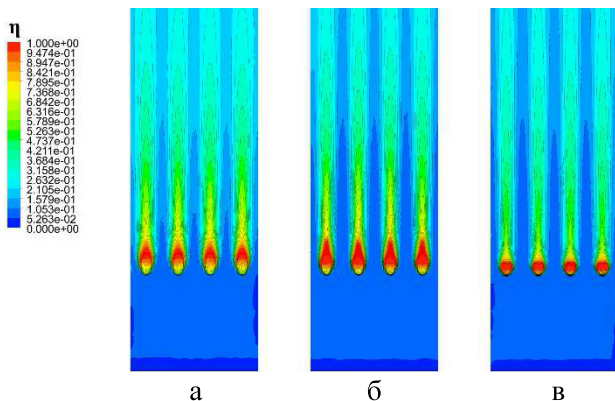


**Рис. 6. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів блокування отворів ( $m = 0,6$ ):**

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

**Fig. 6. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage parameters ( $m = 0.6$ ):**

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

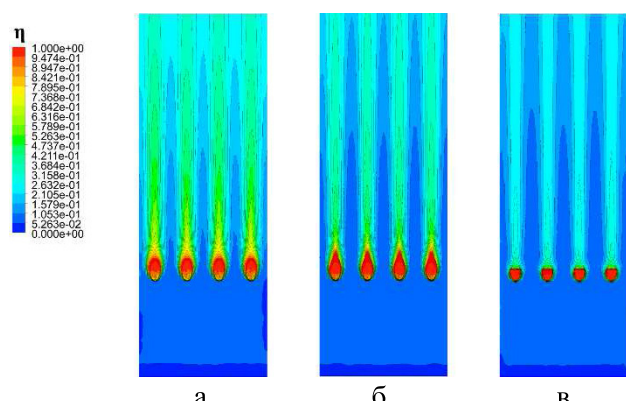


**Рис. 5. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів блокування отворів ( $m = 0,4$ ):**

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

**Fig. 5. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage parameters ( $m = 0.4$ ):**

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



**Рис. 7. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів блокування отворів ( $m = 0,8$ ):**

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

**Fig. 7. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage parameters ( $m = 0.8$ ):**

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

Поперечний розподіл нерівномірний: максимуми ефективності вздовж осей отворів, мінімуми між ними на всій довжині пластини.

Порівняння результатів для різних конфігурацій блокування дозволяє констатувати, що навіть часткове перекриття отворів спричиняє помітне погіршення теплозахисних характеристик системи охолодження. При цьому якісна картина розподілу ефективності залишається подібною, проте рівень захисту поверхні істотно знижується, що має критичне значення для забезпечення надійності та довговічності елементів газових турбін в умовах експлуатації з підвищеним вмістом абразивних частинок у повітрі.

Для визначення усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження використовується залежність, приведена в роботі [7].

На рис. 9–12 наведено розподіл усередненої ефективності вздовж безрозмірної координати  $x/d$  в діапазоні  $0 \leq x/d \leq 15$  для параметрів вдуву  $m = 0.4, 0.6, 0.8$  та  $1.0$  відповідно. Ці залежності дозволяють провести детальний аналіз впливу як параметра вдуву, так і ступеня блокування на інтегральні характеристики системи охолодження в умовах, наближених до реальних експлуатаційних режимів газотурбінних установок.

При збільшенні параметра вдуву  $m$  від  $0.4$  до  $1.0$  усереднена ефективність плівкового охолодження  $\bar{\eta}$  демонструє тенденцію до зниження. Зокрема, для конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ) при  $m = 0.4$  (рис. 9) максимальне значення на початковій ділянці

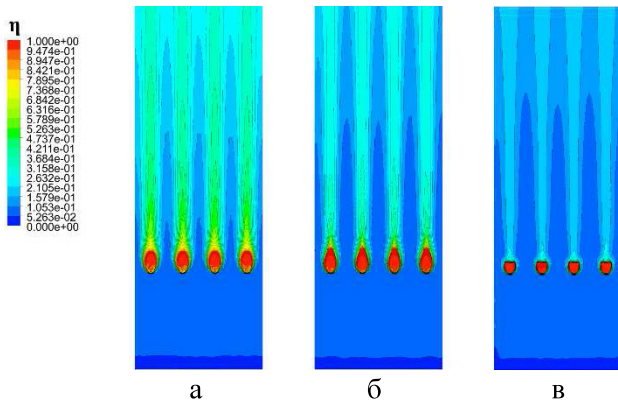


Рис. 8. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів блокування отворів ( $m = 1,0$ ):  
а –  $h/d = 0$ ; б –  $h/d = 0,5$ ; в –  $h/d = 1,0$

Fig. 8. Isolines of local film cooling effectiveness for different hole blockage parameters ( $m = 1,0$ ):  
а –  $h/d = 0$ ; б –  $h/d = 0,5$ ; в –  $h/d = 1,0$

( $x/d \approx 0$ ) досягає  $0.54$ , тоді як при  $m = 1.0$  (рис. 12) воно зменшується до  $0.49$ . Це явище обумовлене збільшенням кінетичної енергії охолоджувального потоку при вищих значеннях  $m$ , що призводить до більш інтенсивного проникнення струменя в основний потік, його раннього відриву від поверхні та посилення турбулентного перемішування, що в кінцевому підсумку знижує захисні властивості охолоджувальної плівки.

Ступінь блокування відіграє визначальну роль у формуванні теплозахисних характеристик. Для всіх

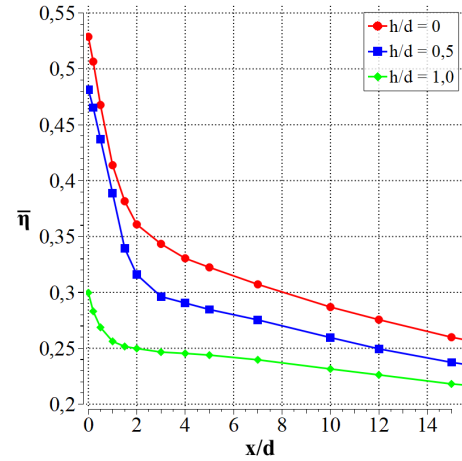


Рис. 9. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,4$

Fig. 9. Spanwise-average film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.4$

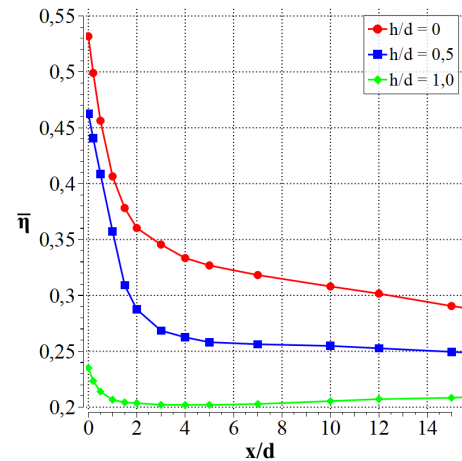
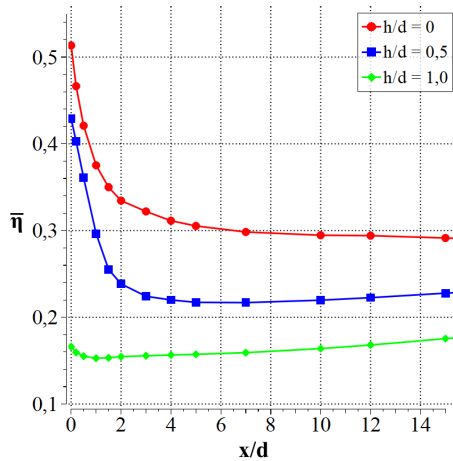


Рис. 10. Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,6$

Fig. 10. Spanwise-average film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.6$

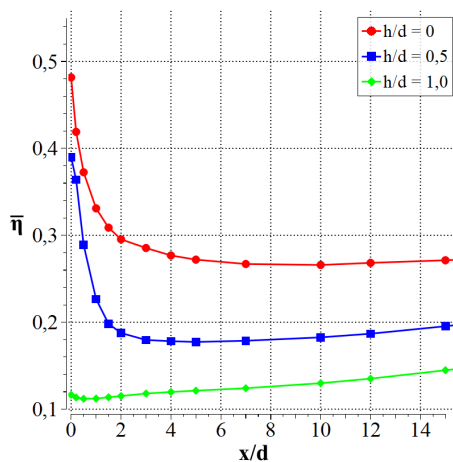
досліджених значень параметра вдуву конфігурація без блокування ( $h/d = 0$ ) забезпечує найвищі значення  $\bar{\eta}$ . Блокування суттєво знижує ефективність (рис. 9-12): при  $m = 0.4$  для  $h/d = 1.0$  падіння становить 44%, при  $m = 0.8$  - до 65%. Характерний різкий градієнт на ділянці  $0 \leq x/d \leq 4$  з наступною стабілізацією при  $x/d \geq 8$ .

На початковій ділянці ( $0 \leq x/d \leq 4$ ) спостерігається різкий градієнт ефективності: зниження до 38% для  $h/d = 0$  через інтенсивне турбулентне перемішування в зоні формування плівки.



**Рис. 11.** Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 0,8$

**Fig. 11.** Spanwise-average film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 0.8$



**Рис. 12.** Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження при блокуванні отворів,  $m = 1,0$

**Fig. 12.** Spanwise-average film cooling effectiveness across the plate with hole blockage,  $m = 1.0$

На віддаленій ділянці ( $x/d \geq 8$ ) ефективність плівкового охолодження стабілізується на рівні 0.17-0.30 залежно від конфігурації, причому вплив блокування залишається помітним по всій довжині.

При  $m = 1.0$  ефект блокування найбільш виражений: зниження ефективності на 39% для  $h/d = 1.0$  через комбінований ефект збільшеного імпульсу та зміненої геометрії виходу.

Важливо відзначити, що в умовах високої неізотермічності ( $R_t = 1.8$ ), що відповідають реальним експлуатаційним режимам ГТУ, абсолютні значення ефективності виявляються вищими порівняно з модельними умовами [7] завдяки більшій різниці температур. Проте якісний характер залежностей та відносний вплив блокування залишаються подібними, що підтверджує універсальність виявлених закономірностей та можливість їх екстраполяції на різні температурні режими роботи систем плівкового охолодження.

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

На рисунку 13 представлено порівняльний аналіз усередненої по всій площі досліджуваної пластини ефективності плівкового охолодження ( $\bar{\eta}$ ) в залежності від параметра вдуву ( $m$ ) для різних ступенів блокування отворів ( $h/d = 0, 0.5, 1.0$ ). Особливістю даного аналізу є співставлення результатів, отриманих для модельних умов з фактором неізотермічності  $R_t = 1.2$  [7] та умов, близьких до реальних експлуатаційних параметрів газотурбінних установок з  $R_t = 1.8$ .

Усереднена по площі ефективність в визначалась залежністю, приведеною в роботі [7].

Аналіз представленої залежності демонструє, що зростання параметра вдуву  $m$  від 0.4 до 1.0 супроводжується монотонним зниженням інтегральної ефективності плівкового охолодження для всіх досліджених конфігурацій. Проте абсолютні значення  $\bar{\eta}$  істотно відрізняються залежно від температурних умов проведення моделювання. Для умов, близьких до реальних ( $R_t = 1.8$ ), при конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ) ефективність знижується з 0.336 при  $m = 0.4$  до 0.289 при  $m = 1.0$ , що становить зменшення на 14%. Для конфігурації з блокуванням  $h/d = 0.5$  спостерігається зниження з 0.290 до 0.199 (на 31%), а для максимального блокування  $h/d = 1.0$  – з 0.240 до 0.127 (на 47%). Загалом результати усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження представлені в таблиці 1.

При  $R_t = 1.8$  ефективність вдвічі вища порівняно з  $R_t = 1.2$  (33.6% та 16.8% відповідно для  $m = 0.4$  без блокування). Детальні дані впливу блокування наведено в таблиці 1.

Характерною особливістю залежностей для реальних умов є менша відносна крутизна спаду ефективності при зростанні параметра вдуву порівняно з модельними умовами. Це свідчить про те, що при вищих температурних градієнтах система плівкового охолодження демонструє більшу стабільність до зміни режимних параметрів, хоча абсолютний рівень ефективності залишається вищим. Разом з тим, негативний вплив блокування зберігає свою значущість: навіть часткове перекриття отворів на 25% площі перерізу

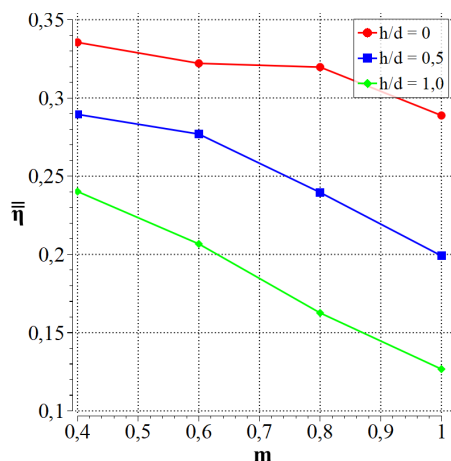


Рис. 13. Усереднена по всій площі ефективності плівкового охолодження за різних значень параметру вдуву  $m$

Fig. 13. Area-averaged film cooling effectiveness for different blowing ratio  $m$

Табл. 1. Порівняльна характеристика усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій відносно параметру вдуву та блокування при різних значеннях параметра неізотермічності  
 Tabl. 1. Comparative characteristics of area-averaged film cooling effectiveness for different configurations relative to blowing parameter and blockage at different non-isothermal parameter values

| h/d         |                                   | 0    | 0.5  | 1.0  |
|-------------|-----------------------------------|------|------|------|
| $R_t = 1.8$ | ( $m = 0.4$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 33,6 | 29   | 24   |
|             | ( $m = 0.6$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 32,2 | 27,7 | 20,7 |
|             | ( $m = 0.8$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 32   | 24   | 16,3 |
|             | ( $m = 1.0$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 28,9 | 19,9 | 12,7 |
| $R_t = 1.2$ | ( $m = 0.4$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 16,8 | 16,3 | 10,8 |
|             | ( $m = 0.6$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 15,8 | 14,1 | 8,1  |
|             | ( $m = 0.8$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 14   | 10,2 | 4,9  |
|             | ( $m = 1.0$ ), % ( $\bar{\eta}$ ) | 10,9 | 6    | 2,1  |

( $h/d = 0.5$ ) призводить до помітного погіршення теплозахисних характеристик, а блокування на 50% ( $h/d = 1.0$ ) спричиняє критичне зниження ефективності, особливо при високих параметрах вдуву.

Наведена в таблиці 1 порівняльна характеристика усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження для різних конфігурацій відносно параметру вдуву та блокування підтверджує, що фактор неізотермічності відіграє ключову роль у формуванні абсолютних значень ефективності. При цьому якісні закономірності впливу блокування та параметра вдуву залишаються подібними для обох температурних режимів, що дозволяє екстраполювати виявлені тенденції на широкий діапазон експлуатаційних умов газотурбінних установок.

### Висновки

Виконане дослідження дозволило встановити вплив неізотермічності потоку на ефективність плівкового охолодження при частковому блокуванні отворів видуву охолоджувача в діапазоні параметру вдуву від 0.4 до 1.0, що відповідає частковому навантаженню ГТУ.

Встановлено, що параметр неізотермічності відіграє визначальну роль у формуванні абсолютних значень ефективності плівкового охолодження. В умовах високої неізотермічності ( $R_t = 1.8$ ), характерної для реальних експлуатаційних режимів транспортних та енергетичних ГТУ, ефективність виявляється практично вдвічі вищою порівняно з модельними умовами ( $R_t = 1.2$ ): при  $m = 0.4$  для базової конфігурації без блокування вона зростає з 16.8% до 33.6%.

Для умов високої неізотермічності ( $R_t = 1.8$ ) при  $m = 0.4$  часткове блокування отворів призводить до зниження усередненої по площі ефективності на 13.7% при  $h/d = 0.5$  та на 28.6% при  $h/d = 1.0$  відносно базової конфігурації. Фізичний механізм цього впливу є комплексним: блокування перерізу при незмінній витраті підвищує швидкість виходу охолоджувача та фактичний параметр вдуву, а також змінює кут викиду струменя, що спричиняє його ранній відрив та інтенсивне турбулентне перемішування з основним потоком. При збільшенні параметра вдуву до  $m = 1.0$ , характерного для підвищених режимів часткової нагрівки, втрати ефективності зростають до 31.1% та 56.1% відповідно.

Важливим є те, що характер впливу блокування має універсальний характер, проте його інтенсивність залежить від температурних умов. Порівняльний аналіз показав, що для низькотемпературних умов ( $R_t = 1.2$ ) при  $m = 0.4$  зниження ефективності плівкового охолодження становило 3.0% для  $h/d = 0.5$  та 35.7% для  $h/d = 1.0$ , тоді як для реальних умов ( $R_t = 1.8$ ) – 13.7% та 28.6% відповідно. Це вказує на те, що при високій неізотермічності система плівкового охолодження демонструє іншу чутливість до геометричних змін отворів, що необхідно враховувати при проектуванні систем охолодження лопаток ГТУ.

Аналіз просторового розподілу ефективності показав збереження поперечної нерівномірності охолоджувальної плівки для всіх досліджених конфігурацій та обох температурних режимів. Локальні максимуми формуються вздовж осей отворів, тоді як між отворами виникають зони зі зниженим теплозахистом. Блокування посилює цю нерівномірність незалежно від рівня неізотермічності.

Отримані результати підкреслюють необхідність урахування реальних температурних умов при проектуванні та оптимізації систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. Екстраполяція даних, отриманих в модельних умовах з низькою неізотермічністю, на реальні експлуатаційні режими може призводити до значних помилок в оцінці ефективності охолодження й температурного стану лопатки. Отримані в роботі дані можуть бути використані для вдосконалення методик розрахунку теплового стану лопаток турбін з урахуванням ефектів неізотермічності та деградації систем плівкового охолодження внаслідок забруднення отворів.

## 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.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\\_HighTemperature\\_Materials\\_for\\_Gas\\_Turbine\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/373049846_HighTemperature_Materials_for_Gas_Turbine_Applications).
3. 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>.
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. 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>.
6. 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>.
7. Khalatov A.A., Данилов М.А. Ефективність плівкового охолодження в умовах забруднення дискретних отворів видуву охолоджувача // Теплофізика та теплоенергетика, 2025. – Т. 47, № 2. – С. 7–16. – DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.1>
8. 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>.
9. 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>.

10. 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.2024.10749611>. 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>.
12. 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>.
13. Kim S.M., Lee K.D., Kim K.Y. Comparative Analysis of Thermal Performance with and without the Non-Isothermal Effect of a Real Film Hole System // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 17. – P. 9778. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179778>
14. 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>.
15. 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>.
16. 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>.
17. 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>.
18. 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>.
19. 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.
20. 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>.
21. Haupt D., Schoppner V., Majschak J.-P., Wozidlo R. Particulate Ash Deposition Reduction on a Film-Cooled Turbine Vane: An Experimental and Numerical Study on the Influence of the Blowing Ratio and Thermal Conditions // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 17. – P. 9778. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179778>
22. Khalatov Artem, Borysov Igor, Dashevskyy Yuri, Reznik Sergey, 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.
23. 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>.
24. 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>.

## EFFECT OF NON-ISOTHERMALITY ON FILM COOLING EFFECTIVENESS UNDER PARTIAL BLOCKAGE OF COOLANT INJECTION HOLES

Danylov M.A.<sup>1</sup>, Khalatov A.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, Leading Engineer, e-mail: danylovmykhailo24@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0265-1286>.*

<sup>2</sup>*Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, Ukraine, 03057, Professor, Department of Applied Physics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com,*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.1>

Modern gas turbine units (GTUs) operate at extremely high temperatures, with mainstream gas temperatures reaching 1700–1750 °C in transport and military applications, while heat-resistant blade materials are limited to approximately 1000–1100 °C. This necessitates advanced cooling techniques to ensure component durability and reliability. Film cooling, achieved by injecting coolant air through inclined holes to form a protective layer on the blade surface, is a widely adopted method. However, the effectiveness of film cooling is significantly influenced by the non-isothermality parameter  $R_t = T_f/T_c$ , which characterizes the temperature ratio between the mainstream and coolant flows. Real GTU operating conditions correspond to  $R_t = 2.0$ – $2.2$ , while most experimental studies are conducted under low non-isothermality conditions ( $R_t \approx 1.2$ ), creating significant uncertainty when extrapolating laboratory data to actual turbine operating conditions.

An additional critical factor affecting cooling effectiveness is partial blockage of coolant injection holes caused by particle deposition (e.g., CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>) during operation in dusty or desert environments, which is particularly relevant for military GTU applications. Research shows that even after 50–200 hours of operation, sufficient deposits can accumulate to partially obstruct the hole cross-section. This study focuses on partial-load operation regimes characterized by reduced blowing ratios ( $m = 0.4$ – $1.0$ ), which are typical when the engine operates below maximum capacity. Such regimes require detailed

investigation considering real temperature conditions, as reduced coolant mass flow can lead to changes in flow structure and thermal protection film redistribution.

**Purpose of the Work.** This study aims to numerically investigate the effect of flow non-isothermality ( $R_t = 1.8$ ) on film cooling effectiveness of a flat surface under partial blockage of coolant injection holes in the blowing ratio range  $m = 0.4$ – $1.0$ , characteristic of partial-load turbine operation. Particular attention is paid to comparative analysis with model conditions ( $R_t = 1.2$ ) and assessment of transverse non-uniformity of coolant film formation in a four-hole configuration.

**Research Methods.** The investigation was conducted using numerical simulations in ANSYS CFX 2019 R2 with the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and SST turbulence model for closure. Three geometric configurations were created: a baseline without blockage and two configurations with partial blockage corresponding to 25% ( $h/d = 0.5$ ) and 50% ( $h/d = 1.0$ ) obstruction of the hole cross-sectional area. The blockage degree was characterized by the dimensionless parameter  $h/d$ , where  $h$  is the maximum transverse blockage height and  $d$  is the hole diameter (0.8 mm). Geometric dimensions were based on typical turbine blade cooling system parameters: hole diameter  $d = 0.8$  mm, transverse pitch  $t = 2.4$  mm ( $t/d = 3.0$ ), and hole inclination angle of 30° relative to the surface. A hybrid unstructured mesh with approximately 1.1 million elements was employed, consisting of tetrahedral elements in the mainstream flow and prismatic layers near solid surfaces. Boundary conditions were set to achieve blowing ratios close to  $m = 0.4, 0.6, 0.8,$  and  $1.0$ . The mainstream velocity was 400 m/s with a temperature of 1100 °C, while the coolant temperature was 500 °C, corresponding to  $R_t = 1.8$  characteristic of real GTU operating conditions. Turbulence intensity was set to 1%, and adiabatic wall boundary conditions ( $\delta Q = 0$ ) were applied to solid surfaces. Symmetry conditions were imposed on lateral surfaces of the computational domain. The model was verified against experimental data for the traditional configuration without blockage ( $h/d = 0$ ) at  $m = 1.0$ , showing a deviation of 9.68%, which is acceptable for CFD simulations of film cooling.

**Results and Conclusions.** Analysis of local film cooling effectiveness distributions revealed that the character of coolant distribution maintains qualitative patterns typical of discrete film cooling with inclined holes, while absolute effectiveness values are significantly higher compared to model conditions ( $R_t = 1.2$ ) due to the greater temperature difference between mainstream and coolant flows, providing

more intensive thermal protection of the surface. The non-isothermality parameter plays a determining role in forming absolute values of film cooling effectiveness. Under high non-isothermality conditions ( $R_t = 1.8$ ), characteristic of real operating regimes of transport and power GTUs, effectiveness is approximately twice as high as under model conditions ( $R_t = 1.2$ ): at  $m = 0.4$  for the baseline configuration without blockage, it increases from 16.8% to 33.6%. A similar trend is observed for all blockage configurations: at  $h/d = 0.5$  and  $m = 0.4$ , effectiveness increases from 16.3% to 29.0%, and at  $h/d = 1.0$  from 10.8% to 24.0%.

For high non-isothermality conditions ( $R_t = 1.8$ ) at  $m = 0.4$ , partial hole blockage leads to a reduction in area-averaged effectiveness of 13.7% for  $h/d = 0.5$  and 28.6% for  $h/d = 1.0$  relative to the baseline configuration. The physical mechanism of this effect is complex: blockage at constant mass flow rate increases coolant exit velocity and effective blowing ratio, while also changing the jet discharge angle, causing early jet separation and intense turbulent mixing with the mainstream flow. As the blowing ratio increases to  $m = 1.0$ , characteristic of elevated partial-load regimes, effectiveness losses increase to 31.1% and 56.1%, respectively.

Importantly, the character of blockage influence is universal, but its intensity depends on temperature conditions. Comparative analysis showed that for low-temperature conditions ( $R_t = 1.2$ ) at  $m = 0.4$ , the reduction in film cooling effectiveness was 3.0% for  $h/d = 0.5$  and 35.7% for  $h/d = 1.0$ , whereas for real conditions ( $R_t = 1.8$ ) it was 13.7% and 28.6%, respectively. This indicates that under high non-isothermality, the film cooling system demonstrates different sensitivity to geometric changes in holes, which must be considered when designing GTU blade cooling systems.

Analysis of spatial effectiveness distribution showed persistence of transverse non-uniformity of the coolant film for all investigated configurations and both temperature regimes. Local maxima form along hole axes corresponding to trajectories of the central portions of coolant jets, while zones with reduced effectiveness appear between holes where the surface remains inadequately protected from thermal exposure. This non-uniformity persists over a significant distance from the holes and does not disappear even with increasing blowing ratio, indicating the limited ability of discrete hole systems to provide continuous film coverage of the surface. Blockage intensifies this non-uniformity regardless of the non-isothermality level.

The obtained results emphasize the necessity of accounting for real temperature conditions when designing and optimizing film cooling systems for gas turbine blades.

Extrapolation of data obtained under model conditions with low non-isothermality to real operating regimes can lead to significant errors in assessing cooling effectiveness and blade thermal state. The data obtained in this work can be used to improve calculation methods for the thermal state of turbine blades, accounting for non-isothermality effects and degradation of film cooling systems due to hole contamination.

References 24, figures 13, tables 1.

**Key words:** non-isothermality, film cooling effectiveness, hole contamination, blockage parameter, computational modeling.

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\\_HighTemperature\\_Materials\\_for\\_Gas\\_Turbine\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/373049846_HighTemperature_Materials_for_Gas_Turbine_Applications).

3. *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>.

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. *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>.

6. *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>.

7. *Khalatov A.A., Данилов М.А.* Ефективність плівкового охолодження в умовах забруднення дискретних отворів видуву охолоджувача // *Теплофізика та теплоенергетика*, 2025. – Т. 47, № 2. – С. 7–16. – DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.1>

8. *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>.
9. *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>.
10. *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>
11. *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>.
12. *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>.
13. *Kim S.M., Lee K.D., Kim K.Y.* Comparative Analysis of Thermal Performance with and without the Non-Isothermal Effect of a Real Film Hole System // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 17. – P. 9778. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179778>
14. *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>.
15. *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>.
16. *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>.
17. *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>.
18. *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>.
19. *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.
20. *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>.
21. *Haupt D., Schoppner V., Majschak J.-P., Woszydlo R.* Particulate Ash Deposition Reduction on a Film-Cooled Turbine Vane: An Experimental and Numerical Study on the Influence of the Blowing Ratio and Thermal Conditions // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 17. – P. 9778. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179778>
22. *Khalatov Artem, Borysov Igor, Dashevskyy Yuri, Reznik Sergey*, 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.
23. *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>.
24. *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>.

Отримано 12.01.2026

Received 12.01.2026

Прийнято до друку 05.02.2026

Accepted for publication 05.02.2026