

Т. В. ДОНИК, О. С. СТУПАК, С. В. ПОТАПОВ, Б. С. ЛАНЬКОВ

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ПЛАСКІЙ ПОВЕРХНІ ЗА ОДНИМ РЯДОМ ТРИКУТНИХ ЗАГЛИБЛЕНЬ З ВІЙМКОЮ ПРИ ЗОВНІШНІЙ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

Стаття присвячена вивченню ефективності плівкового охолодження на плоскій адіабатній поверхні з однорядною системою «дрібних» заглиблень ($h/d = 0,75$) трикутної форми різної конфігурації та подачею охолоджувача через похилі отвори, що розташовані в них. В роботі представлені результати комп'ютерного моделювання ефективності плівкового охолодження на плоскій поверхні при подачі охолоджувача через похилі отвори в трикутні заглиблення. Розрахунки виконані при зміні параметру вдуву 0,5 – 2,0 з використанням SST моделі турбулентності. На охолоджуючій поверхні спостерігається симетрія адіабатної ефективності плівкового охолодження відносно поперечної осі, що свідчить про стійкість охолоджувача поблизу стінки. Локальна ефективність плівкового охолодження має нерівномірний характер з максимумами локальної ефективності охолодження за заглибленнями при малих параметрах вдуву. Зі збільшенням параметру вдуву спостерігається зниження поперечної нерівномірності після ряду трикутних заглиблень. Порівняльний аналіз трикутних заглиблень різної конфігурації показав суттєву перевагу середньої ефективності плівкового охолодження у трикутника з виймкою на передній стінці в порівнянні з класичним трикутником та тангенціальним отвором, яка складає до 70 %. При дослідженні впливу зовнішньої турбулентності ($Tu = 1\%, 5\%, 10\%$) на ефективність плівкового охолодження визначено, що зі збільшенням турбулентності основного потоку виникає зменшення ефективності охолодження до 24 %. Однак на ділянці $x/d < 20$ вплив зовнішньої турбулентності практично відсутній, що пов'язано зі складною вихровою структурою, яка подавляється зовнішньою турбулентністю основного потоку.

Ключові слова: плівкове охолодження, лопатка турбіни, трикутні заглиблення, ефективність, турбулентність.

T. DONYK, O. STUPAK, S. POTAPOV, B. LANKOV

FILM COOLING ON A FLAT SURFACE BEHIND ONE ROW OF TRIANGULAR DIMPLES WITH A NOTCH UNDER EXTERNAL TURBULENCE

The article is devoted to the study of the efficiency of film cooling on a flat adiabatic surface with a single-row system of "small" dimples ($h/d = 0.75$) of triangular shape and the supply of coolant through inclined holes located in them. The paper presents the results of computer modeling of the efficiency of film cooling on a flat surface when the cooler is fed through inclined holes into triangular dimples. Calculations were performed with a change in the blowing parameter 0.5...2.0 using the SST turbulence model. On the cooling surface, there is a symmetry of the adiabatic efficiency of film cooling relative to the longitudinal axis, which indicates the stability of the cooler near the wall. Local efficiency of film cooling has uneven character with maximums of local efficiency of cooling by dimples at low parameters of blowing. With an increase in the blowing parameter, a decrease in transverse unevenness is observed after a series of triangular dimples. Comparative analysis of triangular dimples of different configurations showed a significant advantage of the average efficiency of film cooling in a triangle with a notch on the front wall compared to a classic triangle and a tangential hole, which is up to 70 %. When the influence of external turbulence ($Tu = 1\%, 5\%, 10\%$) on the efficiency of film cooling is studied, it is determined that with an increase in the turbulence of the main flow, a decrease in the cooling efficiency of up to 24 % occurs. However, in the area $x/d < 20$, the influence of external turbulence is practically absent, which is associated with a complex vortex structure, which is suppressed by the external turbulence of the main flow.

Key words: film cooling, turbine blade, triangular dimples, efficiency, turbulence.

Вступ

На сьогодні газотурбінні установки (ГТУ) широко використовуються в енергетиці, цивільній та військовій авіації, судобудівництві, промисловості та газотранспортній системі. Основними перевагами ГТУ є її техніко-економічні характеристики, а саме, конструктивна досконалість, широкий діапазон потужностей (від 2 кВт до 375 МВт), високий ККД (до 40 %), великі агрегатні потужності при малій масі та габаритах, пристосування до автоматизації, висока надійність та економічність, низький рівень шкідливих викидів, великий ресурс, а також низькі капітальні витрати при виготовленні обладнання на її основі.

Одним з основних способів підвищення економічності, питомої потужності, а також поліпшення масогабаритних показників газотурбінних двигунів будь-якого призначення є підвищення температури газу на вході в турбіну, що, в свою чергу, обмежується властивостями жароміцності металів. (рис. 1).

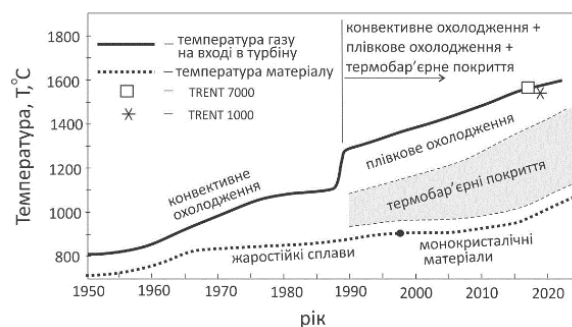


Рис. 1 – Тенденція зростання температури газу на вході в турбіну та температури матеріалу лопатки по роках за даними [1]

Як показав аналіз, приведений в [2] – [5], не дивлячись на використання нових жароміцних матеріалів, впровадження технологій монокристалічного литва і литва з направленою кристалізацією, а також застосування захисних покриттів, досягнення таких високих температур газу (до 1600 °C) стало можливим в основному за рахунок

© Т. В. Доник, О. С. Ступак, С. В. Потапов, Б. С. Ланьков, 2023

вдосконалення систем охолодження соплових і робочих лопаток газових турбін.

Для охолодження використовується стиснуте повітря, яке відбирається від компресора. При розробці системи охолодження забезпечується як зниження температури поверхні до допустимих значень (для робочих лопаток – 1300 °С), так і зниження нерівномірності температурного поля лопатки. Для підвищення ефективності охолодження здебільшого збільшують витрату повітря охолоджувача, яка не може перевищувати 15 % від відбираючого повітря, оскільки при цих умовах термодинамічні та газодинамічні втрати в газовій турбіні можуть перевищити позитивний ефект, який забезпечується охолодженням. Тому актуальним науково-технічним напрямком є пошук інноваційних схем охолодження лопаток, які забезпечують високу ефективність охолодження при менших витратах охолоджувача. При цьому найбільший інтерес представляє зовнішня система плівкового охолодження, коли охолоджувач з внутрішньої порожнини лопатки подається на зовнішню поверхню через систему дискретних отворів та формує захисну плівку повітря на поверхні лопатки. В цьому напрямку найбільш перспективна подача охолоджувача в заглиблення різної форми.

Як показав огляд виконаних досліджень [6] серед багатьох факторів, що впливають на ефективність охолодження відіграє форма заглиблення. Так подача охолоджувача в систему отворів в траншеї, яка виконана в межах теплозахисного покриття лопатки, забезпечує найбільш високу ефективність плівкового охолодження завдяки попереднім розширенням охолоджувача в траншеї та суттєвим зниженням розмірів «ниркоподібного» (вторинного) вихора за траншеєю. Однак при такій конфігурації з'являються високі термічні напружки, що сприяють руйнуванню теплозахисного покриття, в якому виконана траншея. Альтернативою траншеї є поверхневі заглиблення різних конфігурацій (циліндричні, еліптичні, трикутні, напівциліндричні), які завдяки найнижчому проникненню охолоджуючого струменя в основний потік показують високу ефективність плівкового охолодження при широкому діапазоні параметру вдуву. Як показали результати роботи [7] заглиблення трикутної форми продемонстрували найкращу ефективність плівкового охолодження при всіх коефіцієнтах вдуву завдяки найнижчому проникненню охолоджувального струменя в основний потік. Також поверхневі заглиблення характеризуються невисокою вартістю виробництва. Таким чином, метою даної роботи є вивчення ефективності плівкового охолодження на пласкій поверхні з однорядною системою трикутних заглиблень та подачею охолоджувача через похилі отвори, які розташовані в них, а також вплив зовнішньої турбулентності на ефективність охолодження.

Мета роботи

Метою даної роботи є вивчення ефективності плівкового охолодження на пласкій адіабатній поверхні з однорядною системою «дрібних» заглиблень ($h/d = 0,75$) трикутної форми та подачею охолоджувача через похилі отвори, що розташовані в них, провести порівняльний аналіз з різними конфігураціями плівкового охолодження. Також досліджується вплив зовнішньої турбулентності на ефективність плівкового охолодження, для цього використовуються низькотурбулентні умови, при яких інтенсивність турбулентності потоку на вході в канал задавалася рівною 1 %.

В роботі використано комп'ютерне моделювання, в основі якого лежать чисельні рішення диференціальних рівнянь руху та енергії потоку. Розрахунки виконані для високотемпературних умов, які характерні для енергетичних та приводних газових турбін. Теплофізичні властивості потоку були задані апроксимуючими поліномами в залежності від температури.

Геометрична модель

Геометрична модель схеми плівкового охолодження представлена на рис. 2, а. Модель являє собою канал постійного прямокутного перерізу висотою $H = 8$ мм, шириною $W = 9,6$ мм та довжиною $L = 59,6$ мм. На нижній адіабатній поверхні на відстані $L_1 = 12$ мм розташований один ряд трикутних заглиблень з виїмкою на передній стінці (рис. 3). Охолоджувач з другого каналу, висотою $h = 4$ мм, шириною $w = 9,6$ мм та довжиною $l = 10$ мм, подається по каналу циліндричної форми діаметром $d = 0,8$ мм під кутом до пласкої поверхні $\alpha = 30^\circ$ в трикутні заглиблення, які розташовані в один ряд (кількістю – 4 отвори) з поперечним кроком $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$) (рис. 2, б).

Всі тверді поверхні моделі задані як адіабатні стінки. На бокових поверхнях моделі використані граничні умови симетрії.

Неструктурована розрахункова сітка моделі мала розмірність $2,527 \cdot 10^6$ елементів. Локальне пристінкове згущення сітки поблизу твердих стінок складало 30 сітчастих елементів, що відповідає вимогам використаної в розрахунках SST-моделі турбулентності та забезпечує зміну параметру y^+ в пристінних ділянках розрахункової моделі в діапазоні 1,5 – 2,0.

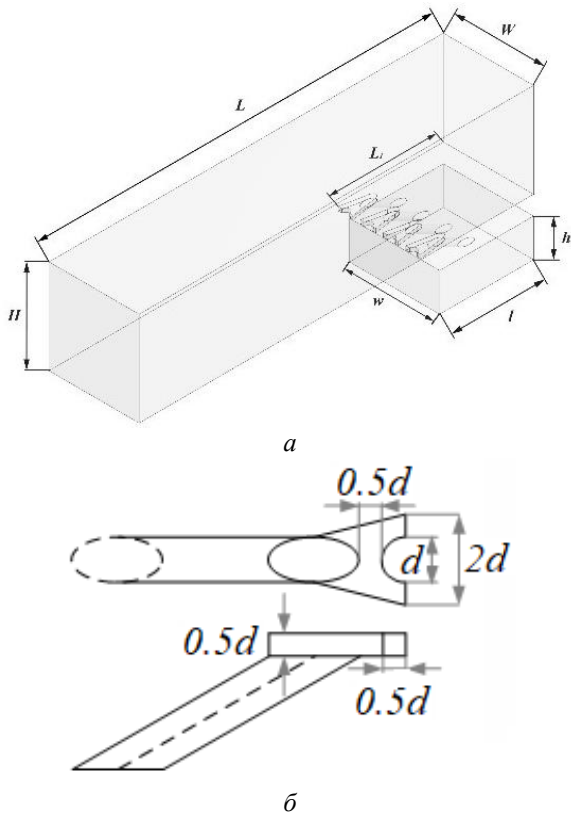


Рис. 2 – Комп’ютерна модель:
а – геометрична модель; б – параметри трикутних заглиблень з виймкою на передній стінці

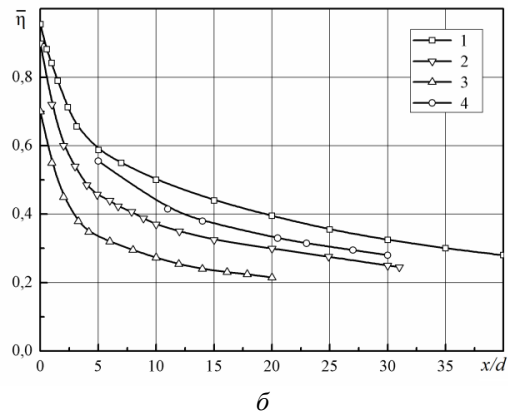
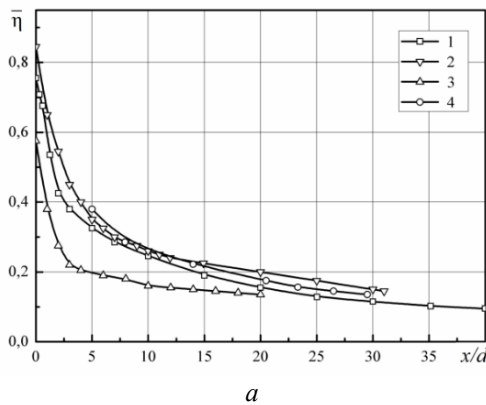


Рис. 3 – Усереднена в поперечному напрямку направленні ефективність плівкового охолодження за «дрібною» траншеєю ($h/d = 0,50$):
а – $m = 1,0$; б – $m = 2,0$; 1 – SST-модель при $DR = 0,83$; 2 – експериментальні дані при $DR = 1,3$ [9]; 3 – експериментальні дані при $DR = 1,07$ [9]; 4 – експериментальні дані авторів [7] при $DR = 0,83 - 0,85$.

Середня ефективність плівкового охолодження по ширині пластини визначалася усередненням локальних значень

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

де $n = 50$ – число розрахункових точок по ширині пластини.

Граничні умови та верифікація

Швидкість основного потоку становила 35 м/с, температура вторинного потоку – 90 °С, температура основного потоку – 30 °С. Інтенсивність турбулентності рівна 1 %.

Верифікація моделі турбулентності була виконана для однорядної схеми отворів в «дрібній» траншеї ($h/d = 0,5$), як наближеної форми до трикутних заглиблень. Як видно з рис. 4, при малих та великих параметрів вдуву результати розрахунку для SST-моделі знаходяться в задовільному узгодженні з експериментальними даними автора [6] та результатами роботи [8]. Дослідні дані [9] розташовані трохи нижче цих результатів.

Результати розрахунку

Локальна ефективність плівкового охолодження визначалася з рівняння

$$\eta = \frac{T_1 - T_{aw}}{T_1 - T_2},$$

де T_{aw} – температура адиабатної плоскої поверхні;

T_1, T_2 – температура потоку та охолоджувача.

На рис. 4 представлені розрахункові залежності для усереднених по ширині пластини ефективності плівкового охолодження для однорядної системи трикутних заглиблень з виїмкою на передній стінці при різних параметрів вдуву. Тут x/d – без-

розмірна довжина пластини. Для порівняння на рисунку представлені розрахунки для традиційних отворів без заглиблень та дані роботи [10] при трикутних заглибленнях.

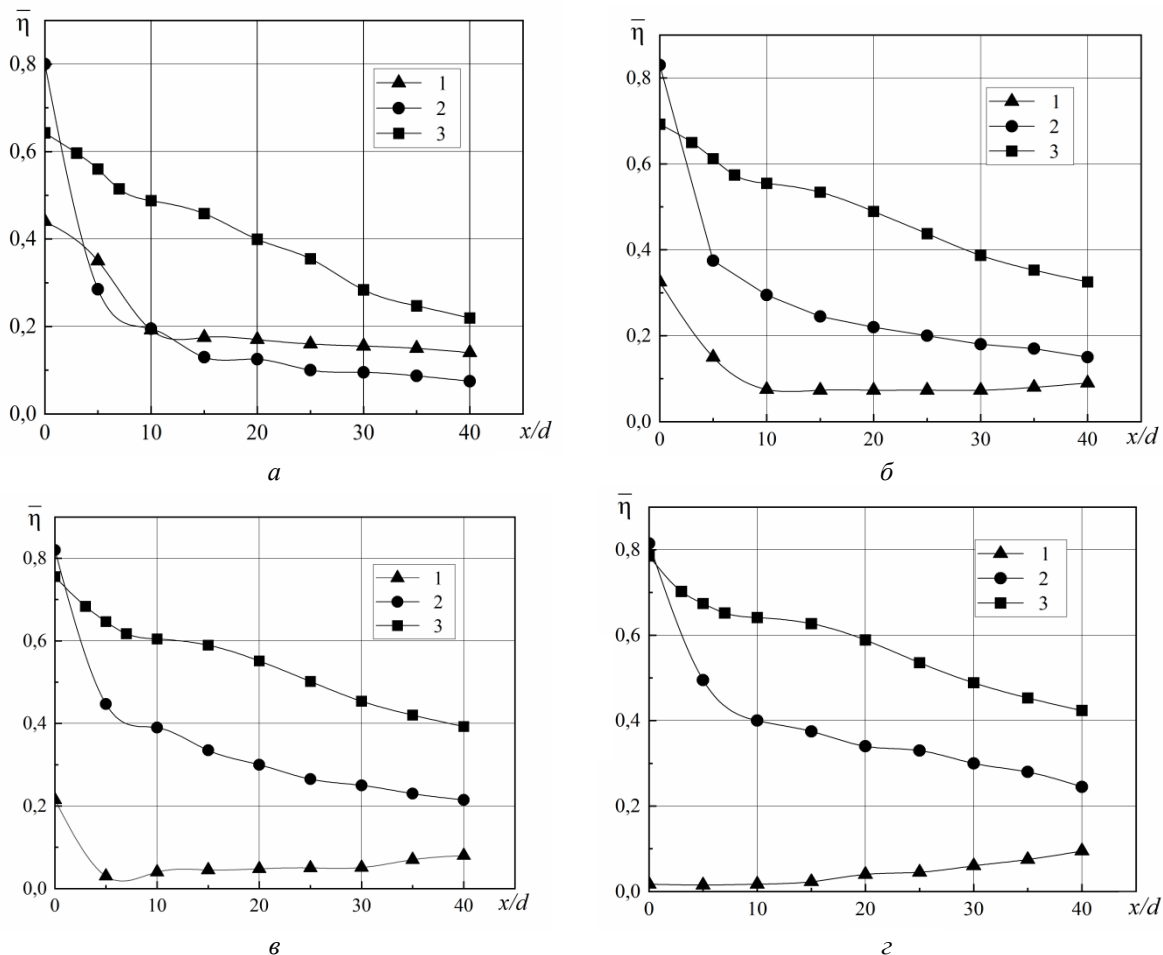


Рис. 4 – Залежність середньої в поперечному напрямку адиабатної ефективності:

$a - m = 0,5$; $б - m = 1,0$; $в - m = 1,5$; $з - m = 2,0$; 1 – тангенціальні отвори;

2 – трикутне заглиблення класичної форми [10]; 3 – трикутні заглиблення з виїмкою на передній стінці

Як показали результати, для всіх конфігурацій ефективність плівкового охолодження зростає зі збільшенням параметру вдуву $m = 0,5 - 2,0$ та знижується вздовж поверхні $0 < x/d < 40$. При малих значеннях параметра вдуву $m = 0,5$ спостерігається різке підвищення ефективності плівкового охолодження зразу після виводу із заглиблення ($0 < x/d < 5$), що пов'язано з інтенсивною турбулізацією потоку.

Порівняльний аналіз різної конфігурації плівкового охолодження показав суттєву перевагу середньої ефективності охолодження у трикутника з виїмкою на передній стінці в порівнянні з класичним трикутником та тангенціальним отвором, яка складає до 70 %. У зв'язку з нерівномірністю потоку та складною вихровою структурою після ви-

дуву охолоджувача спостерігається зниження середньої ефективності охолодження при $m = 0,5$ для трикутних заглиблень на 11 % в порівнянні з виводом охолоджувача в тангенціальні отвори. При збільшенні параметру вдуву $m = 1,0 - 2,0$ картина змінюється – ефективність плівкового охолодження для трикутних заглиблень різко збільшується.

На рис. 5. для аналізу потоків побудовано залежності локальної ефективності охолодження від довжини охолоджуючої поверхні в поперечному напрямку для однорядної системи трикутних заглиблень з виїмкою на передній стінці. Для даної поверхні помітна симетричність розподілення охолоджувача на поверхні з вираженими піками ефективності охолодження.

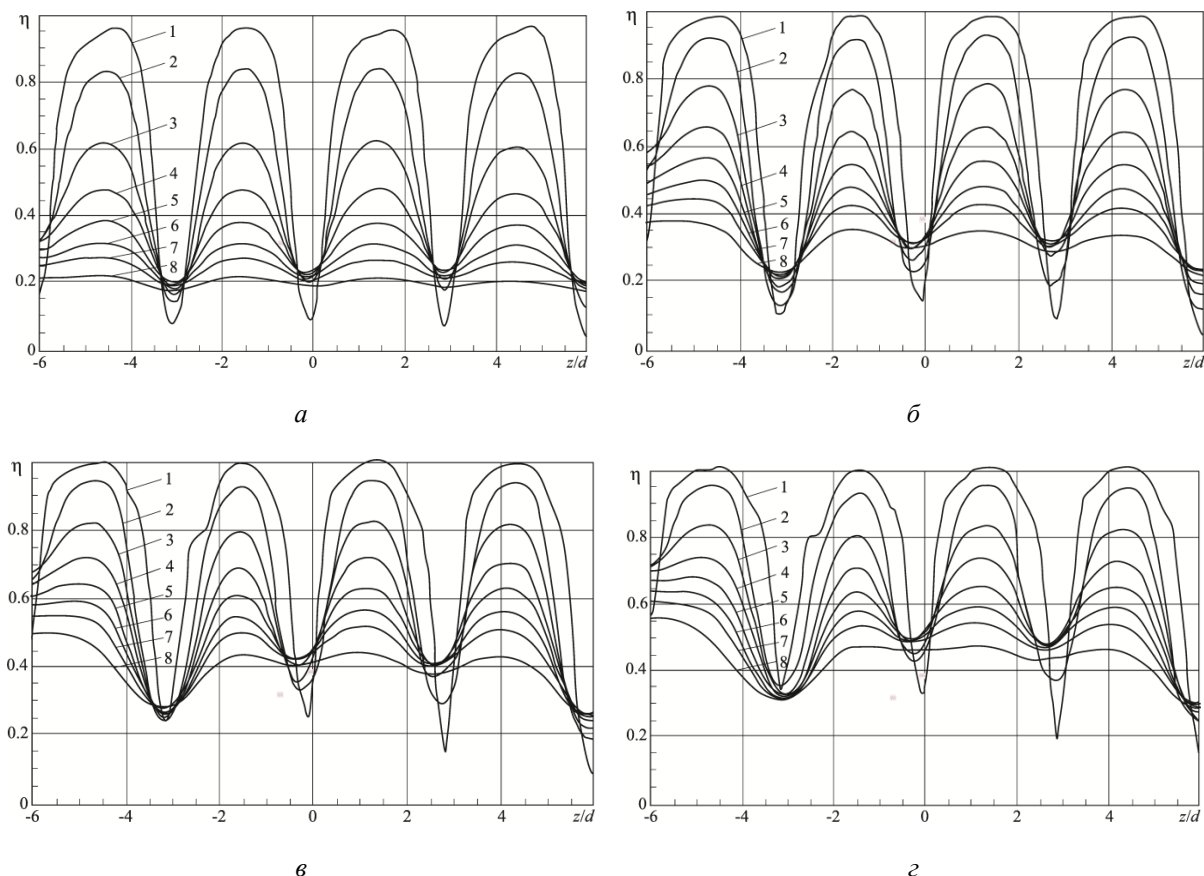


Рис. 5 – Локальна ефективність в поперечному напрямі для плоскої поверхні з однорядною системою трикутних заглиблень з виїмкою: *a* – $m = 0,5$; *б* – $m = 1,0$; *в* – $m = 1,5$; *г* – $m = 2,0$;
 $1 - x/d = 0$; $2 - 5$; $3 - 10$; $4 - 15$; $5 - 20$; $6 - 25$; $7 - 30$; $8 - 40$

На рис. 6 представлені вектори швидкості та температурні поля в перпендикулярній проекції до площини пластини при $x/d = 0, 3, 5$ для параметру вдуву $m = 1,0$. Як видно з рисунків, пара мілких «ниркових» вихорів утворюється відразу після поверхневих заглиблень із затуханням його вздовж пластини. Також спостерігається розтікання струменів після поверхневих заглиблень, що призводить до покращення плівкового охолодження.

На рис. 7 представлені ізолінії полів ефективності охолодження при різних параметрів вдуву для схеми трикутних заглиблень з виїмкою на передній стінці.

Незважаючи на присутність вихрової структури на виході з трикутних заглиблень, плівка охолоджувача покриває всю поверхню пластини з суттєвим збільшенням ефективності за заглибленнями.

На рис. 8 представлені результати середньої ефективності плівкового охолодження зі збіль-

шенням зовнішньої турбулентності основного потоку. Як видно, збільшення турбулентності призводить до зменшення ефективності охолодження до 24%. Однак на ділянці $x/d < 15$ вплив зовнішньої турбулентності практично відсутній, що може бути пов'язано з подавленням вторинних структур, які виникають при видуві охолоджувача з трикутних заглиблень.

На рис. 9 наведені ізолінії полів ефективності для поверхні з трикутними заглибленнями з виїмкою на передній стінці при зовнішній турбулентності $Tu = 5\%$; та 10% .

На плоскій поверхні розвиваються різкі піки, що говорить про нерівномірний покрив поверхні охолоджувачем, що в свою чергу дає гірший результат для плівкового охолодження лопатки із збільшенням зовнішньої турбулентності основного потоку.

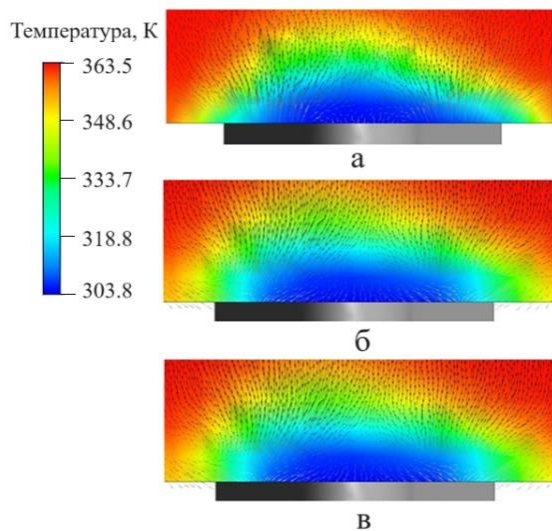


Рис. 6 – Проекції векторів швидкості та полів температури в поперечному напрямі на плоскій поверхні при $m = 1$: а – $x/d = 0$; б – 3; в – 5

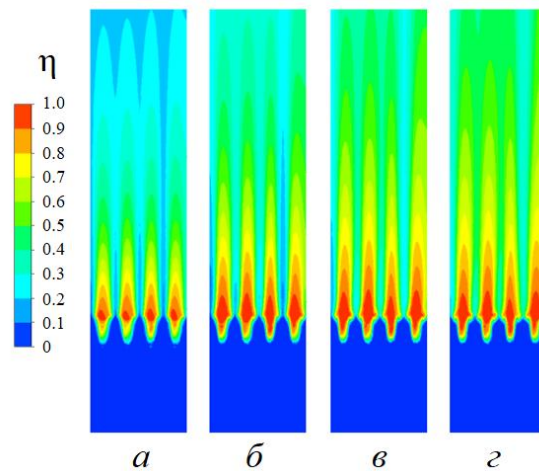


Рис. 7 – Ізолії полів ефективності для плоскій поверхні: а – $m = 0,5$; б – 1,0; в – 1,5; г – 2,0

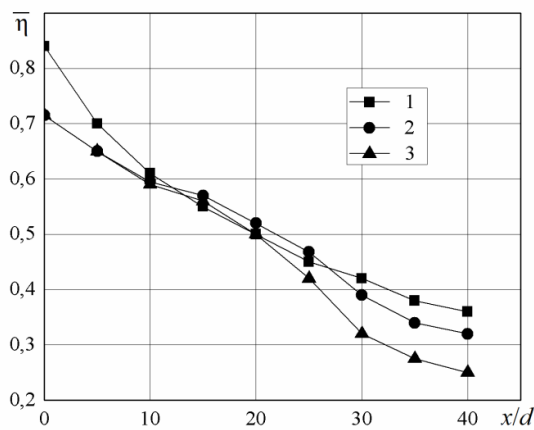


Рис. 8 – Локальна ефективність охолодження на плоскій поверхні з трикутними заглибленнями трикутної форми при зовнішній турбулентності при $m = 1$: 1 – $Tu = 1\%$; 2 – 5%; 3 – 10%

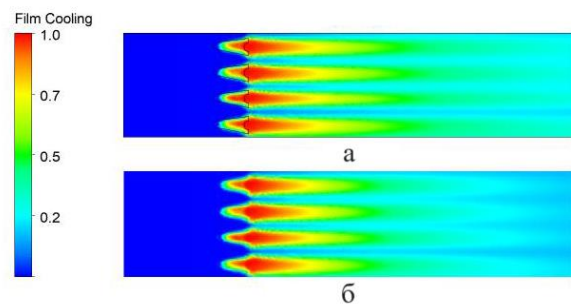


Рис. 9 – Ізолії полів ефективності охолодження на плоскій поверхні з трикутними заглибленнями при зовнішній турбулентності при $m = 1$: а – $Tu = 5\%$; б – 10%

Висновки

Виконано комп'ютерне моделювання ефективності плівкового охолодження з подачею охолоджувача через однорядну систему отворів в трикутних заглибленнях з виїмкою на передній стінці в умовах зовнішньої турбулентності. Показано, що ефективність плівкового охолодження при видуві охолоджувача в трикутні заглиблення з виїмкою розподіляється симетрично вздовж пластини та має до 70% вищі показники з середньої ефективності, ніж з видувом охолоджувача через тангенціальні отвори та класичні трикутники. Максимальні значення середньої по поверхні ефективності плівкового охолодження знаходяться в діапазоні параметру вдуву $m = 1,5 - 2,0$. Зовнішня турбулентність призводить до зниження ефективності плів-

кового охолодження для трикутних заглиблень з виїмкою на передній стінці при $x/d < 15$, що пов'язано з перемішуванням основного потоку з охолоджувачем і руйнуванні захисної плівки.

Список літератури

1. Rao A. Chapter 1.3.2 Advanced Brayton cycles / A. Rao ; National Energy Technology Laboratory // The Gas Turbine Handbook. – 2006. – P. 115–121. – URL: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/1-3-2.pdf> (дата звернення: 12.09.2023).
2. Ольховский Г. Г. Газовые турбины для энергетики / Г. Г. Ольховский // Теплоэнергетика. – 2004. – № 1. – С. 33–43.
3. Ковецкий В. М. Газотурбинные двигатели в энергетике: достижения, особенности, возможности / В. М. Ковецкий, Ю. Ю. Ковецкая // Проблемы общей энергетики. – 2008. – № 17. – Т. 17. – С. 24–30.

4. Халатов А. А. Тенденции развития систем охлаждения лопаток высокотемпературных энергетических ГТД. Часть 1. Современное состояние / А. А. Халатов, В. В. Романов, Ю. Я. Дашевский, Д. Н. Письменный // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 1. – С. 53–61. – ISSN 0204-3602.
5. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : в 10-ти томах : Т. 9. Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин : моногр. / А. А. Халатов, В. В. Романов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Д. Северин. – Київ : Ін-та технічної теплофізики НАН України, 2010. – 317 с. – ISBN 978-966-02-5694-1.
6. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : моногр. : Т. 10: Перспективные схемы пленочного охлаждения / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Б. Резник. – Киев : НТУУ «КПИ» ; «Политехника», 2016. – 238 с. – ISBN 978-966-622-785-3.
7. Jindal P. Effect of Hole Shapes, Orientation and Hole Arrangements on Film Cooling Effectiveness / P. Jindal, A. K. Roy, R. P. Sharma // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. – 2016. – Vol. 17, Is. 3. – P. 341–351. – DOI: <https://doi.org/10.5139/IJASS.2016.17.3.341>.
8. Waye S. K. High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations / S. K. Waye, D. G. Bogard // The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Journal of Turbomachinery. – 2007. – Vol 129, Is. 2. – P. 294–302. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2464141>.
9. Harrison K. L. Comparison of RANs turbulence models for prediction of film cooling performance / K. L. Harrison, D. G. Bogard // The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2008. – No. GT2008–51423. – P. 1187–1196. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2008-51423>.
10. Khalatov A. A. Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples / A. A. Khalatov, O. O. Petliak, S. D. Severin, N. A. Panchenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. Vol. 980. – 6 p. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/980/1/012024>.
3. Kovetsky V. M., Kovetskaya Y. Y. (2008), “Gazoturbinnye dvigateli v e'nergetike: dostizheniya, osobennosti, vozmozhnosti [Gas turbine engines in the energy sector: achievements, features, opportunities]”, *Problemy` zagal'noyi energety`ky` [Problems of general energy]*, vol. 17, pp. 24–30.
4. Khalatov A., Romanov V., Dashevsky Yu., Pismenny D. (2010), “Tendencii razvitiya sistem oxlazhdeniya lopatok vysokotemperaturnyx e'nergeticheskix GTD. Chast' 1. Sovremennoe sostoyanie [High performance gas turbine blasw cooling: trends of development. Part 1. Modem state]”, *Industrial heat engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 53–61, ISSN 0204-3602.
5. Khalatov A. A., Romanov V. V., Borisov I. I., Dashevsky Y. Y., Severin S. D. (2010), *Tendencii razvitiya sistem oxlazhdeniya lopatok vysokotemperaturnyx e'nergeticheskix GTD. Chast' 1. Sovremennoe sostoyanie* [Heat exchange and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Vol. 9. Heat and Mass Exchange and Hydrodynamics in Cyclone Cooling of Gas Turbine Blades], Technical Thermal Physics Institute of NAS of Ukraine, 317 p, ISBN 978-966-02-5694-1.
6. Khalatov A. A., Borisov I. I., Dashevsky Yu. Ya., Reznik S. B. (2016), *Teploobmen i gidrodinamika v polyax centrobezhnyx massovyx sil : monogr. : T. 10: Perspektivnye sxemy plenochnogo oxlazhdeniya* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces : monograph : Vol. 10: Prospective film cooling schemes], NTUU “KPI”, Kiev, Ukraine, 238 p, ISBN 978-966-622-785-3.
7. Jindal P., Roy A. K., Sharma R. P. (2016), “Effect of Hole Shapes, Orientation and Hole Arrangements on Film Cooling Effectiveness”, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 17, is. 3, pp. 341–351, <https://doi.org/10.5139/IJASS.2016.17.3.341>.
8. Waye S. K., Bogard D. G. (2007), “High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations”, *The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Journal of Turbomachinery*, vol 129, is. 2, pp. 294–302, <https://doi.org/10.1115/1.2464141>.
9. Harrison K. L., Bogard D. G. (2008), “Comparison of RANs turbulence models for prediction of film cooling performance”, *The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, No. GT2008–51423, pp. 1187–1196, <https://doi.org/10.1115/GT2008-51423>.
10. Khalatov A. A., Petliak O. O., Severin S. D., Panchenko N. A. (2018), “Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 980, 6 p, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/980/1/012024>.

References (transliterated)

1. Rao A. ; National Energy Technology Laboratory (2006), “Chapter 1.3.2 Advanced Brayton cycles”, *The Gas Turbine Handbook*, pp. 115–121, Access mode: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/1-3-2.pdf> (accessed 12 September 2023).
2. Olkhovsky G. G. (2004), “Gazovye turbiny dlya e'nergetiki [Gas turbines for power industry]”, *Heat power engineering*, no. 1, pp. 33–43.

Надійшла (received) 18.10.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Доник Тетяна Василівна (Donyk Tetyana) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України, старший викладач кафедри Прикладна фізика Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (063) 483–18–45; e-mail: donikt@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1476-5560>.

Ступак Олег Станіславович (Stupak Oleh) – доктор філософії у галузі Теплоенергетики, заступник директора з науково-організаційної роботи Інституту технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України, м. Київ; тел.: (098) 446–22–35; e-mail: stupakalewka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-3115>.

Потанов Семен Володимирович (Potanov Semen) – аспірант кафедри Прикладна фізика Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (098) 322–15–64; e-mail: samrotanoff@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8934-6590>.

Ланьков Богдан Сергійович (Lankov Bohdan) – студент ННФТІ, спеціальність Прикладна фізика Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (097) 646–85–66; e-mail: blankovsr@gmail.com.