

УДК 536.244:621.438

«ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ З ПОДАЧЕЮ ВТОРИННОГО ПОТОКУ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ В ПОПЕРЕЧНІЙ ТРАНШЕЇ»

Потапов С.В.¹, аспірант, Халатов А.А.², академік НАН України

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна, orcid.org/0009-0000-8934-6590, e-mail: sampotapoff@gmail.com

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2023.5>

У роботі представлені результати комп'ютерного моделювання ефективності плівкового охолодження на випуклій і увігнутій поверхні постійної кривизни при турбулентному режимі основного потоку. Вторинний потік (охолоджувач) подавався через дискретні отвори, що знаходяться в траншеї, дослідження виконано для параметру вдуву m в діапазоні від 0,5 до 2,0. В розрахунках використовувалась SST модель турбулентності, низькотемпературні умови і низька турбулентність. Результати розрахунків показали слабкий вплив криволінійності поверхні на ефективність плівкового охолодження. На випуклій поверхні отримані результати практично співпадають з даними для плоскої поверхні, а на увігнутій – ефективність зменшується в області $3 < x/d < 30$ при $m = 1.5$ і 2.0 .

The paper presents the results of computer modeling of the efficiency of film cooling on a convex and concave surface of constant curvature in the turbulent regime of the main flow. The secondary flow (coolant) was supplied through a discrete open located in the trench, the study was performed for the injection parameter m in the section from 0.5 to 2.0. The SST turbulence model, low-temperature conditions and low turbulence were used in the calculations. The results of the calculations showed a weak influence of surface curvilinear on the efficiency of film cooling. On a convex surface, the obtained results practically coincide with the data for a flat surface, and on a curved surface, the efficiency decreases in the region $3 < x/d < 30$ at $m = 1.5$ and 2.0 .

Бібл. 6, рис. 11, табл. 2.

Ключові слова: плівкове охолодження, випукла і увігнута поверхні, комп'ютерне моделювання, траншея.

d – діаметр отвору вдуву;

m – параметр вдуву;

T – температура, °C;

t – поперечний крок між отворами;

w – швидкість потоку;

x – позаддовжня координата;

y – координата, перпендикулярна поверхні охолодження;

z – поперечна координата;

R – радіус кривизни;

η – ефективність плівкового охолодження.

Індекси:

a_w — адіабатна стінка;

2 – параметр потоку-охолоджувача;

∞ — параметри основного потоку.

Скорочення:

ГТД – газотурбінні двигуни;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

RANS – моделювання на базі усереднених рівнянь

Нав'є-Стокса.

Вступ. Газові турбіни знаходять широке застосування в різних галузях, таких як авіа- та суднобудування, стаціонарна енергетика та газотранспортні системи. Ці турбіни характеризуються значним діапазоном потужності, компактними розмірами, високою маневреністю та надійністю у використанні.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних енергетичних газотурбінних установок потужністю 10 МВт-375 МВт становить приблизно 35...40%. Збільшення ККД та потужності газових турбін досягається шляхом підвищення температури газів перед турбіною і підвищення ступеня стиснення повітря в компресорі.

На сьогоднішній день в потужних газотурбінних установках вхідні температури газу мають значення близько 1500 °C, в авіаційних газотурбінних двигунах військового значення – 1650...1700 °C, а в нових проектах закладена температура до 1900 °C [1, 2]. З подібних температурних режимів впливає необхідність застосування різних методів охолодження.

Плівкове охолодження відноситься до зовнішнього типу охолодження та інтегрується у конструкцію лопатки. Робоча лопатка являється термічно навантаженим елементом конструкції та практично визначає ресурс

та термін експлуатації ГТД, тому сучасні дослідження ставлять за мету підвищення ефективності плівкового охолодження. На даний момент є одним із основних типів охолодження та є досить поширеним у світі.

Традиційно, як сама проста у виробництві, застосовується схема плівкового охолодження з подачею повітря з внутрішнього об'єму лопатки турбіни на її поверхню через ряди дискретних похилих отворів. Однак подібна конфігурація має невисокі показники ефективності охолодження і, до того ж, з ростом параметру вдуву m відбувається відрив потоку охолоджувача від поверхні, що зводить ефективність охолодження нанівель. Схема з підводом охолоджувача через дискретні отвори в поперечній траншеї має більш високі результати з точки зору ефективності плівкового охолодження, технологічності та відносної простоти виготовлення, що зазначено в ряді робіт [3-5].

Більшість досліджень проведені на плоских поверхнях, що нехарактерно для реальної геометрії лопатки газової турбіни. Метою даної роботи є дослідження ефективності плівкового охолодження з подачею охолоджувача в поперечну траншею на випуклій та увігнутій (радіус кривизни $R = 50$ мм) поверхнях в широкому діапазоні зміни параметру вдуву m (0.5...2.0). Щоб мінімізувати вплив інших факторів, розрахунки проведені в низькотемпературних умовах, турбулентність потоку складала 1%.

Комп'ютерне моделювання. Для даного дослідження обраний теоретичний підхід (комп'ютерне моделювання). Для реалізації використовується комплексний програмний пакет ANSYS CFX 2020 R2, де будується геометрія моделі, розрахункова сітка, визначається система рівнянь, необхідні параметри системи та моделі турбулентності, розв'язувач, що вирішує задачу за заданих умов. Інструментарій цього програмного пакету дозволяє дослідити фізичну структуру потоків, вихорових явищ та дослідити фактори, які впливають на ефективність охолодження плівкового охолодження. Розрахунки проводились на базі рівнянь Нав'є-Стокса осереднених по Рейнольдсу (RANS), а для замкнення системи рівнянь використовується SST-модель турбулентності.

Геометрія моделей. В рамках даного дослідження була вибрана конфігурація поперечної траншеї, де використовуються дискретні циліндричні отвори. Проведено порівняльний аналіз трьох різновидів конфігурацій каналу: плоского (рис. 1), випуклого (рис. 2) та увігнутого (рис. 3). Геометричні моделі представляють собою канали прямокутного перерізу, до яких охолоджуючий потік подається з зовнішнього середовища через циліндричні отвори. У таблиці 1 наведено докладні значення параметрів геометрії кожної моделі.

На рис. 4 наведена деталізація схеми з виводом охолоджувача через дискретні отвори в поперечній

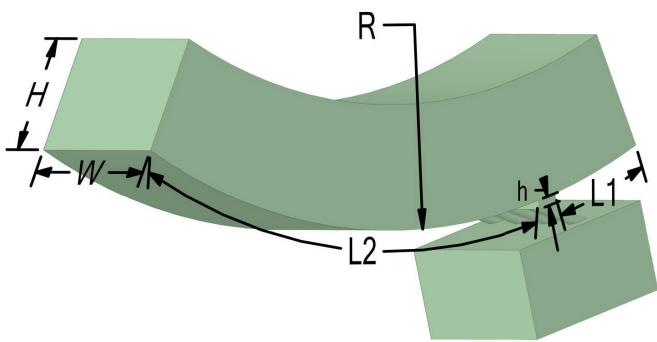


Рис. 1. Геометрія увігнутого каналу

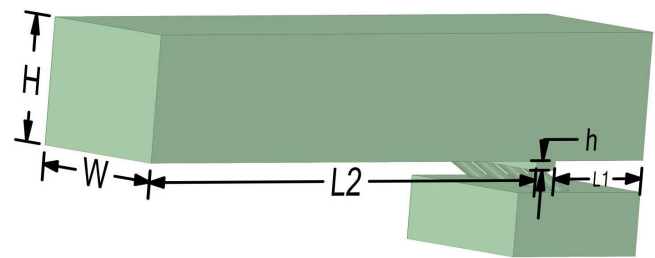


Рис. 3. Геометрія плоского каналу

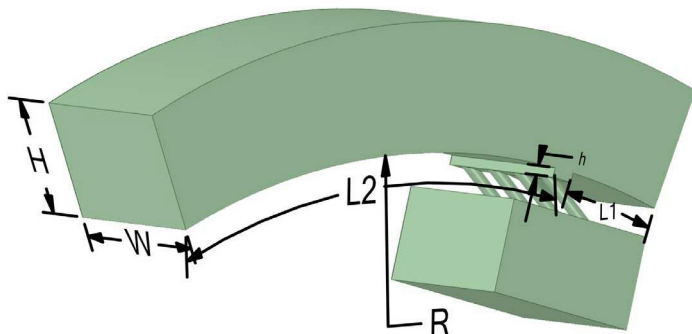


Рис. 2. Геометрія випуклого каналу

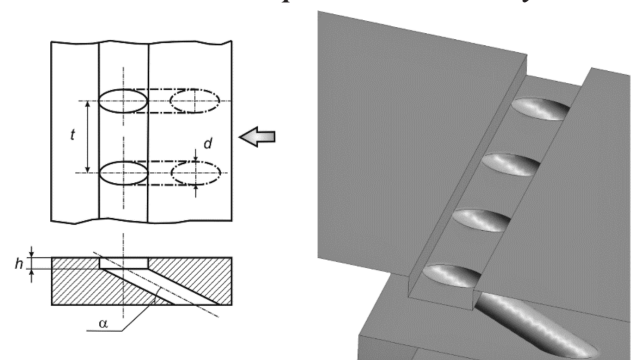


Рис. 4. Схема геометрії траншеї

траншеї. Геометрія цієї конфігурації траншеї задана наступним чином: діаметр отвору d прийнятий за 0,8 мм, поперечний крок між отворами $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$), висота траншеї $h = 0,6$ мм ($h/d = 0,75$), кут нахилу циліндричних з'єднань до поверхні $\alpha = 30^\circ$.

Граничні умови. Розрахунки були виконані при значеннях параметру вдуву $m = \{0.536, 0.98, 1.554, 2.066\}$. Для спрощення записів в подальшому будуть використані округлені значення параметру вдуву $m = \{0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$. Основний потік мав швидкість 37 м/с при температурі 20°C , тоді як температура вторинного потоку-охолоджувача становила 80°C (обернена схема теплового потоку). Інтенсивність турбулентності була прийнята на рівні 1%. Тверді стінки каналу (верхня стінка, область робочої ділянки) визначені як адіабатні. На бічних поверхнях були задані умови симетрії.

Розрахункова сітка моделі. Для розрахунку ефективності охолодження плівкового охолодження в цій роботі використовується комбінована сітка. Процес побудови сітки відбувається в спеціальному модулі ANSYS Mesh. Сітка побудована неструктуровано з тетраедрів в області основного потоку, а поблизу

стінок робочої поверхні, де необхідне згущення сітки, використовуються структуровані призматичні елементи. Безрозмірний параметр $y^+ < 1$, що є вимогою для адекватної роботи SST-моделі турбулентності. Деталі сітки для кожної геометрії наведені в таблиці 2.

SST модель турбулентності і її верифікація. В розрахунках використана SST-модель турбулентності, яка широко використовується при моделюванні плівкового охолодження. [3-5] Вона поєднує в собі принципи двох моделей турбулентності: "k- ϵ " для основної області течії та "k- ω " для пристінних областей стінки, де турбулентні ефекти домінують. SST-модель дозволяє точно відтворювати різні типи течій, включаючи ламінарні та турбулентні, і є корисною при моделюванні областей зі складними геометричними особливостями. Поєднання цих характеристик дає можливість отримувати адекватні результати при використанні цієї моделі.

Для забезпечення адекватності моделі, проведено порівняння результатів розрахунків для отворів в траншеї на плоскій поверхні з наявними даними. На рисунках 6 (а-г) зображені порівняння експериментальних даних різних авторів [5, 6], а також наявних даних ІТТФ,

Таблиця 1. Деталі розрахункової сітки для обраних конфігурацій

Модель/параметр геометрії (мм)	Траншея на плоскій поверхні	Траншея на випуклій поверхні	Траншея на вигнутій поверхні
H	8	8	8
W	9.6	9.6	9.6
L1	7.5	7.49	8.12
L2	33.2	32.06	36.95
h	0.6	0.6	0.6
R	-	50	50

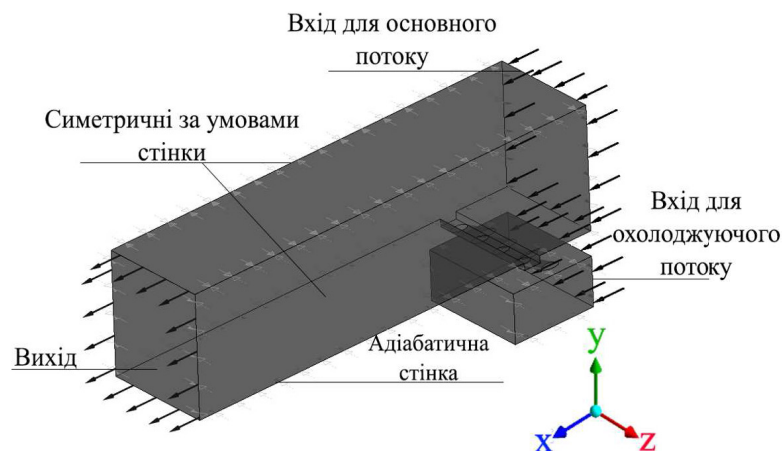


Рис. 5. Граничні умови

Таблиця 2. Деталі розрахункової сітки для обраних конфігурацій

Модель	Кількість тетраедральних елементів	Кількість призматичних елементів	Кількість вузлів сітки	Кількість елементів сітки	Кількість сітки в області згущення
Траншея на плоскій поверхні	735 718	908 160	604 089	1 643 878	20
Траншея на випуклій поверхні	728 756	863 960	580 013	1 592 716	20
Траншея на вигнутій поверхні	720 678	845 761	566 216	1 566 439	20

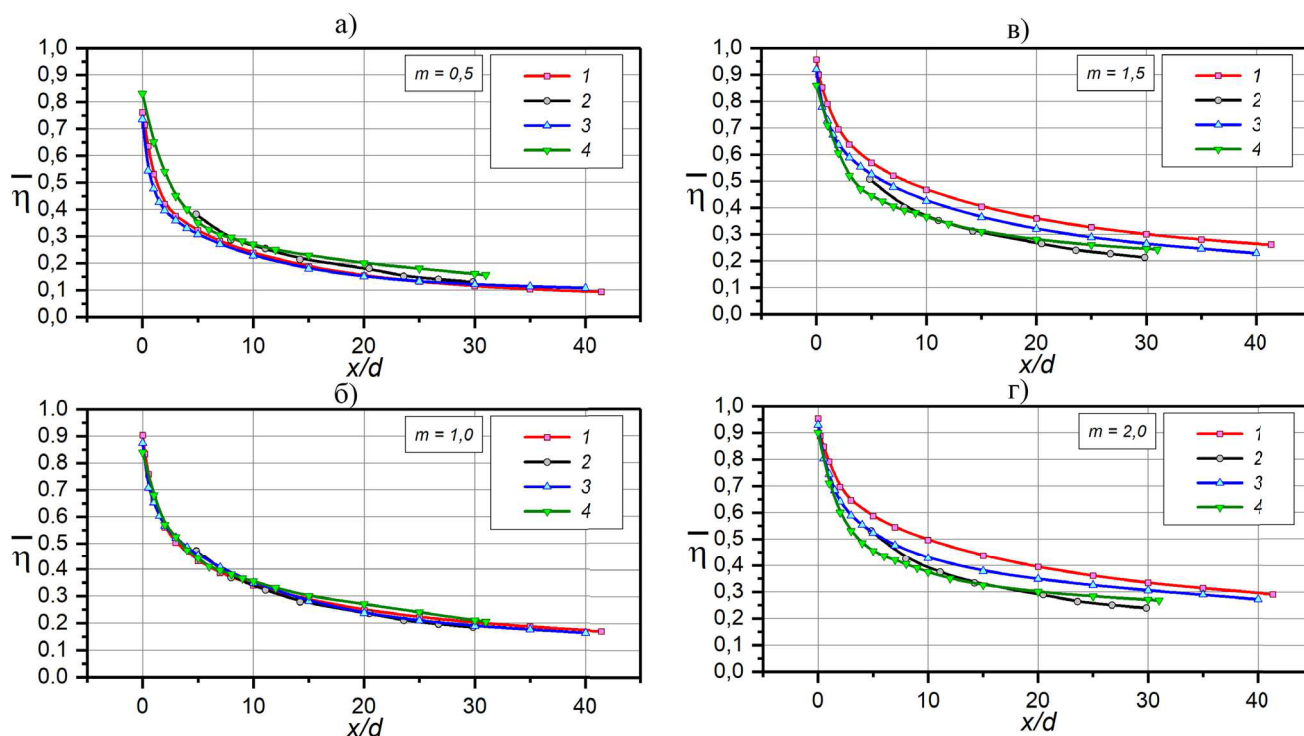


Рис. 6. Порівняння залежностей поперечно осередненої ефективності плівкового охолодження по довжині пластини для параметру вдуву m в діапазоні від 0,5 до 2,0, де: 1 – моделювання ІТТФ SST-модель ($DR=0.83$), 2 – експеримент ІТТФ ($DR=0.83$), 3 – моделювання охолодження плоскої поверхні (дана робота), 4 – експеримент Вей, Богарт ($DR=1.3$) [6]

з результатами модельних розрахунків. Результати показують, що дані розрахунків добре співвідносяться з експериментальними і розрахунковими даними різних авторів, що підтверджує адекватність SST-моделі турбулентності при моделюванні плівкового охолодження за траншеєю.

Результати їх обговорення. Для оцінки ефективності плівкового охолодження використовується адіабатична ефективність плівкового охолодження η :

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

де T_{∞} і T_2 – температура основного потоку і температура потоку-охолоджувача.

Для подібних задач є характерне використання такого поняття як параметр вдуву, який описується рівнянням:

$$m = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_{\infty} w_{\infty}} \quad (2)$$

де ρ_2 і w_2 – щільність і швидкість вторинного потоку-охолоджувача, ρ_{∞} і w_{∞} – щільність і швидкість основного потоку.

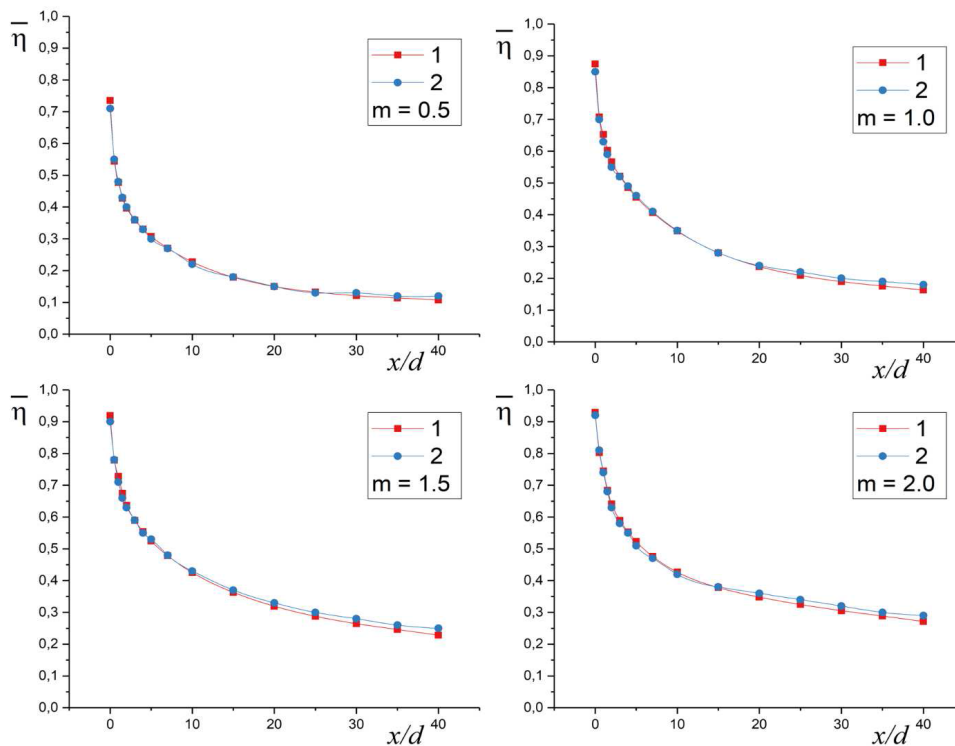


Рис. 7. Осереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження для: 1 – на прямій поверхні; 2 – на випуклій поверхні

Розділ містить результати розрахунків моделювання плівкового охолодження з випуском охолоджувача через циліндричні отвори в траншеї для трьох випадків (рис. 4): випуклої, увігнутої та прямої поверхонь. Наведені кількісні параметри ефективності охолодження, порівняльна характеристика усіх трьох випадків для параметрів вдуву зі значеннями $m = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$.

Випукла поверхня. Для аналізу на рис. 7 наведені графіки залежності осередненої по ширині ефективності охолодження на відповідних довжинах (x/d) охолоджуваної поверхні. З рисунку видно, що ефективність охолодження випуклої поверхні практично співпадає з даними для плоскої поверхності за будь-якого значення параметру вдуву. В обох випадках ефективність охолодження зростає з параметром вдуву m , що є характерним для схеми з вдувом охолоджувача через циліндричні отвори в траншеї [3 - 5]. Для даної конфігурації вплив випуклої кривизни на ефективність плівкового охолодження є мінімальним.

На рис. 8 наведені ізолінії полів ефективності газової завіси у випадку видуву охолоджувача через отвори в поперечній траншеї для прямої та випуклої поверхонь при $m = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$. Для обох випадків ха-

рактерна висока рівномірність розподілу температурних полів з малою вираженістю піків ефективності охолодження, що на практиці зменшує температурні перепади. Для випуклої поверхні характерні більша поперечна симетрія та симетрій вздовж ліній току за отворами в порівнянні з випадком плоскої поверхні.

В цілому, використання систем зі схемою подачі охолоджувача через отвори в поперечній траншеї забезпечує рівномірний розподіл полів ефективності охолодження по поверхні випуклої пластини на усьому діапазоні $m = 0.5 \dots 2.0$. Проте за значення параметра вдуву $m = 2.0$ з'являється сильна осьова асиметрія, що пояснюється виникненням у траншеї інтенсивних вихорів, які виникають за рахунок зростаючої швидкості потоку охолоджувача. З полів ефективності видно, що на випуклій поверхні розподіл температур більш рівномірний. Однією з причин чому ефективність вища при випуклій поверхні є те, що центробіжні масові сили мають консервативний характер, що в результаті придушує розвиток турбулентних процесів.

Увігнута поверхня. З рис. 9, видно, що ефективність охолодження на вигнутій поверхні знижується відносно плоского випадку з ростом параметра вдуву.

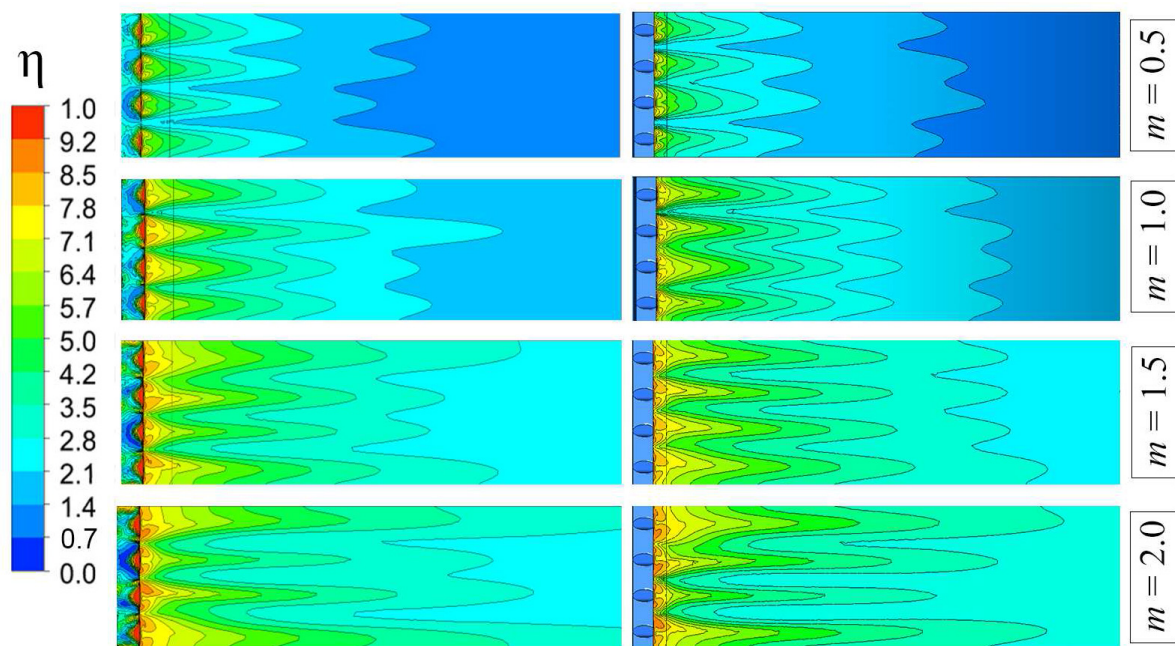


Рис. 8. Поля ефективності плівкового охолодження для плоскої (зліва) та випуклої (справа) поверхонь

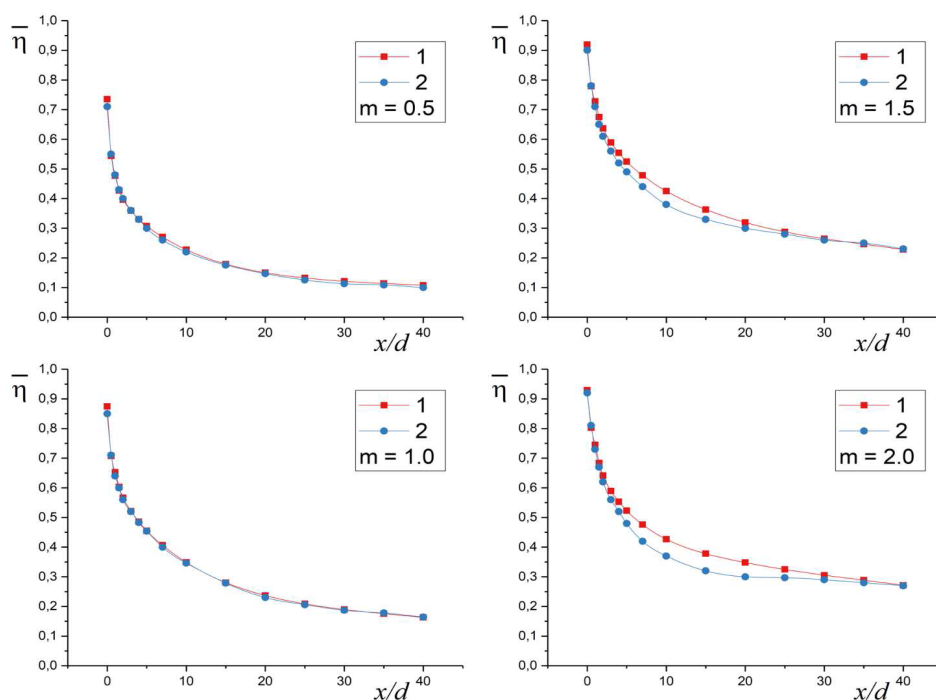


Рис. 9. Осереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження для: 1 – на прямій поверхні; 2 – на увігнутій поверхні

Для параметрів вдуву $m = 0.5$; 1.0 поведінки кривих ідентичні одна одному. Проте починаючи з параметру вдуву $m = 1.5$; 2.0 на стабілізаційній та робочій ділянці $x/d > 3.0$ ефективність охолодження на вигнутій поверхні зменшується у порівнянні з випадком плоскої поверхні. Проте на ділянці $x/d > 30$ ефективність обох випадків

геометрії практично вирівнюється. На рис. 10 зображені поля ефективності плівкового охолодження для випадку вигнутої поверхні. Для параметрів вдуву до 1.0 включно, характер покриття полів ефективності однаковий, проте з ростом швидкості охолоджувача на вигнутій поверхні проявляється значна поперечна асиметрія.

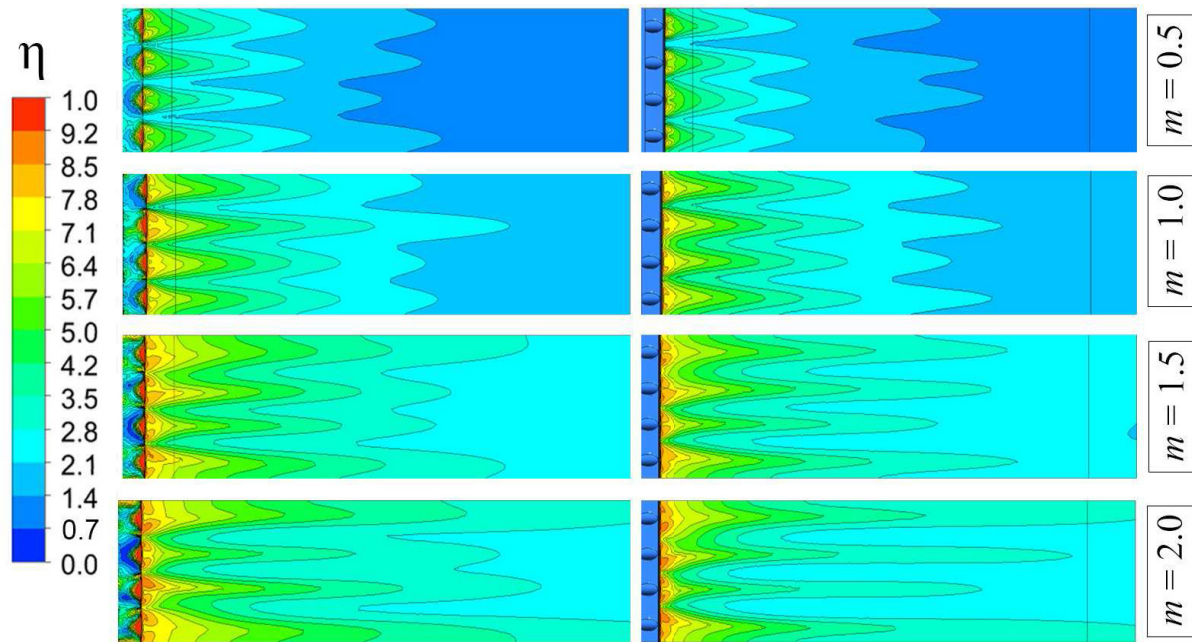


Рис. 10. Поля ефективності плівкового охолодження для плоскої (зліва) та увігнутої (справа) поверхонь

На рис. 10 продемонстровано, що охолодження за високих параметрів вдуву на вигнутій поверхні має більш яскраво виражені піки ефективності охолодження та досить різкі температурні перепади. Зниження ефективності охолодження на увігнутій поверхні спричинене масовими силами активного характеру, які сприяють розвитку турбулентності.

Висновки.

За результатами моделювання ефективності плівкового охолодження з подачею охолоджувача через дискретні отвори в траншеї на плоскій та криволінійних (випукла та вигнута) поверхнях були отримані наступні результати:

1. У випадку випуклої поверхні, вплив кривизни на ефективність плівкового охолодження практично відсутній. Для випуклої поверхні характерна більша поперечна симетрія локальної ефективності плівкового охолодження в порівнянні з випадком плоскої поверхні.

2. У випадку увігнутої поверхні, для початкової області $x/d < 3$ вплив кривизни відсутній і проявляється тільки при $x/d > 3$ та $m = 1.5, 2.0$. Для параметрів вдуву до 1.0 включно, характер покриття полів ефективності однаковий, проте з ростом параметру вдуву на вигнутій поверхні проявляється значна поперечна асиметрія локальної ефективності плівкового охолодження в порівнянні з випадком плоскої поверхні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dutta, S.; Kaur, I.; Singh, P. Review of Film Cooling in Gas Turbines with an Emphasis on Additive Manufacturing-Based Design Evolutions. *Energies* 2022, 15, 6968. <https://doi.org/10.3390/en15196968>
2. Jiangpeng Li, Ziti Liu ma Ruoxuan Ye. "Current Status and Prospects of Gas Turbine Technology Application". B: Journal of Physics Conference Series. T. 2108. Journal of Physics Conference Series. Листоп. 2021, 012009, с. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2108/1/012009>
3. Khalatov, A.A., Panchenko, N.A., Borisov, I.I. et al. Numerical Simulation of Film Cooling with a Coolant Supplied Through Holes in a Trench. *J Eng Phys Thermophy* 90, 637–643 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1610-1>
4. Liao G, Wang X, Li J, Zhou J. Effect of trench width and blowing ratio on double-jet film cooling embedded in trenches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2015;229(3):256-269. doi:10.1177/0957650915570350
5. Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, S. V., and Bunker, R. S. (September 25, 2008). "Effect of Trench Width and Depth on Film Cooling From Cylindrical Holes Embedded in Trenches." *ASME. J. Turbomach.* January 2009; 131(1): 011003. <https://doi.org/10.1115/1.2950057>
6. Waye, S. K., and Bogard, D. G. (July 14, 2006). "High-Resolution Film Cooling Effectiveness Measurements of Axial Holes Embedded in a Transverse Trench With Various Trench Configurations." *ASME. J. Turbomach.* April 2007; 129(2): 294–302. <https://doi.org/10.1115/1.2464141>

«FILM COOLING OVER THE CURVED SURFACES WITH COOLANT SUPPLY INTO THE TRANSVERSE TRENCH»

Potapov S.V.¹, Khalatov A.A.²

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, orcid.org/0009-0000-8934-6590, e-mail: sampotapoff@gmail.com

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2023.5>

The present research centers on the phenomenon of film cooling across curved surfaces with coolant delivery through a transverse trench. The primary objective of this work is to scrutinize the efficacy and physical characteristics of film cooling under controlled conditions, simulating a system where coolant is supplied via a single series of inclined holes within a transverse trench.

This study focuses on the examination of film cooling efficiency of surfaces characterized by both negative and positive curvature, juxtaposed with a reference flat surface. The research endeavors to delineate the impact of the curvature of the surface to the efficiency of film cooling when coolant is supplied through a sole series of inclined holes within the transverse trench. Calculations were executed under minimal external factors (low temperatures, no rotation, low turbulence) to determine “clear” impact of the curvature.

Given the intricate nature of fluid dynamics and heat transfer phenomena involved in this context, the experimental investigation was executed using computational fluid dynamics (CFD) simulations facilitated by the commercial software package ANSYS CFX 2020 R2.

The SST turbulence model, low-temperature conditions and low turbulence were used in the calculations.

The results of the calculations showed a weak influence of surface curvilinearities on the efficiency of film cooling. On a convex surface, the obtained results practically coincide with the data for a flat surface, and on a curved surface, the efficiency decreases in the region $3 < x/d < 30$ at $m = 1.5$ and 2.0 .

References 6, Fig. 11, Table 2.

Keywords: film cooling, trench, curved surfaces, film cooling efficiency, computer simulation.

1. Dutta, S.; Kaur, I.; Singh, P. Review of Film Cooling in Gas Turbines with an Emphasis on Additive Manufacturing-Based Design Evolutions. *Energies* 2022, 15, 6968. <https://doi.org/10.3390/en15196968>

2. Jiangpeng Li, Ziti Liu ma Ruoxuan Ye. “Current Status and Prospects of Gas Turbine Technology Application”. B: Journal of Physics Conference Series. T. 2108. Journal of Physics Conference Series. Листоп. 2021, 012009, с. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2108/1/012009>

3. Khalatov, A.A., Panchenko, N.A., Borisov, I.I. et al. Numerical Simulation of Film Cooling with a Coolant Supplied Through Holes in a Trench. *J Eng Phys Thermophy* 90, 637–643 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1610-1>

4. Liao G, Wang X, Li J, Zhou J. Effect of trench width and blowing ratio on double-jet film cooling embedded in trenches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2015;229(3):256-269. [doi:10.1177/0957650915570350](https://doi.org/10.1177/0957650915570350)

5. Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, S. V., and Bunker, R. S. (September 25, 2008). "Effect of Trench Width and Depth on Film Cooling From Cylindrical Holes Embedded in Trenches." *ASME. J. Turbomach.* January 2009; 131(1): 011003. <https://doi.org/10.1115/1.2950057>

6. Wayne, S. K., and Bogard, D. G. (July 14, 2006). "High-Resolution Film Cooling Effectiveness Measurements of Axial Holes Embedded in a Transverse Trench With Various Trench Configurations." *ASME. J. Turbomach.* April 2007; 129(2): 294–302. <https://doi.org/10.1115/1.2464141>

Отримано 04.09.2023

Received 04.09.2023

Прийнято до друку 23.11.2023
Accepted for publication 23.11.2023