

УДК 536.244:621.438

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ В УМОВАХ ОБЕРТАННЯ ПРИ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА В ТРИКУТНІ КРАТЕРИ

Халатов А.А.^{1,2}, академік НАН України, Панченко Н.А.^{1,2}, канд. техн. наук, Петляк О.О.²

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.01>

Наведено результати теоретичного дослідження ефективності плівкового охолодження однорядної схеми з подачею охолоджувача через отвори в поверхневих заглибленнях трикутної форми в умовах обертання.

Представлены результаты теоретического исследования эффективности пленочного охлаждения однорядной схемы с подачей охладителя через отверстия в поверхностных углублениях треугольной формы в условиях вращения.

The results are given towards theoretical investigation of the film cooling efficiency over a flat plate with coolant supply into round holes arranged in the triangular dimples and under a surface rotation.

Бібл. 6, рис. 8.

Ключові слова: плівкове охолодження, трикутні поверхневі заглиблення, параметр вдуву, параметр обертання, ефективність плівкового охолодження, комп'ютерне моделювання.

d – діаметр отвору вдуву,

h – висота поверхневого заглиблення,

$m = w_2 \rho_2 / w_1 \rho_1$ – параметр вдуву,

Ro – параметр обдування,

T – температура потоку,

t – поперечний крок розташування отворів,

w – швидкість потоку,

α – кут нахилу отвору до поверхні охолодження,

$\eta = (T_1 - T_{aw}) / (T_1 - T_2)$ – ефективність плівкового охолодження,

Нижні індекси:

aw – параметри на адіабатичній стінці,

2 – параметри вторинного потоку,

1 – параметри основного потоку.

Вступ

В сучасних газотурбінних двигунах температура робочого тіла на виході із камери згоряння досягає 1500...1800 °С, що виходить за межі робочих температур конструкційних матеріалів лопатки. В даний час лопатки турбіни, виконані з кращих жаростійких матеріалів, можуть працювати без охолодження при температурі газу не вище 1100 °С. Тому при високих значеннях температури газу для забезпечення працездатності лопаток, наряду з теплоізоляційними (жаростійкими) покриттями, використовується також внутрішнє (конвективне) та зовнішнє (плівкове) охолодження [1]. Традиційно охолоджувач подається з внутрішньої порожнини лопатки на охолоджувану поверхню через щілину або систему дискретних отворів діаметром 0,5...0,8 мм. За високих температур газу витрата повітря на охолодження лопаток при конвективно-плівковому охолодженні може становити 15% і більше від витрати повітря через компресор, тому при подальшому підвищенні температури витрата охолоджувача зростає настільки, що втрати від змішування основного потоку з охолоджувачем можуть перевищити позитивний ефект, досягнутий за рахунок охолодження. У зв'язку з цим великий практичний інтерес має пошук альтернативних схем плівкового охолодження, що володіють при-

йнятною з точки зору термодинамічної ефективності витратою охолоджувача, високою теплофізичною ефективністю і характеризуються відносно нескладною технологією виготовлення.

У роботах [2, 3] було показано, що подача охолоджувача в траншею забезпечує високу ефективність і рівномірність плівкового охолодження. Однак при цьому з'являються високі термічні напружки в лопатці, що сприяють руйнуванню теплозахисного покриття, в якому виконані поверхневі заглиблення. Тому великий практичний інтерес представляють схожі за конфігурацією схеми плівкового охолодження (прямокутні, трикутні). В роботі [4] була наведена порівняльна характеристика плівкового охолодження при використанні двох альтернативних схем: з видувом охолоджувача в траншею і трикутні заглиблення (запатентована в ІТТФ НАНУ [5]) та традиційної схеми, з одним рядом похилих отворів. Ці розрахунки були проведені в стаціонарній постановці задачі. Аналіз результатів роботи [4] показав, що середня адіабатна ефективність плівкового охолодження при використанні трикутних кратерів для параметрів вдуву $m = 1,0$ і більше є вищою на 10...60% ніж при використанні традиційної схеми. Але ефективність плівкового охолодження в загальному випадку залежить від дуже великої кількості різних

факторів. З усього різноманіття факторів, в найменшій мірі вивчено вплив обертання лопатки [6].

Метою роботи є дослідження теплофізичних закономірностей і визначення залежностей, які характеризують фізичну структуру та ефективність плівкового охолодження при подачі охолоджувача через один ряд трикутних заглиблень (рис.1) в умовах обертання охолоджуваної поверхні.

Дослідження фізичної моделі системи плівкового охолодження плоскої поверхні з видувом охолоджувача через один ряд похилих отворів в трикутні кратери (рис.2) було виконано в середовищі ANSYS Design Manager. Геометричні параметри були прийняті наступними: діаметр подаючих циліндричних отворів $d = 0,8$ мм; відносний крок $t = 3d$, відносна глибина кратерів $h = 0,5d$, число отворів у ряді $N_{\text{отв}} = 4$, кут нахилу $\alpha = 30^\circ$. Відносні довжини основної ділянки та ділянки гідродинамічної стабілізації основного каналу розрахункової моделі склали, відповідно, $40d$ та $10d$. Для забезпечення можливості виконання розрахунків з урахуванням обертання модель після її побудови в базовій системі координат YOX була переміщена вздовж базової осі OX на відстань, що відповідає радіусу обертання $r = 400$ мм за допомогою функції Body Operation. Для цього необхідно попередньо створити додаткову площину паралельну базовій площині ZOY (рис.2). Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерним для реальних систем плівкового охолодження лопаток високотемпературних газових турбін.

Для виконання CFD – моделювання була використана неструктурована комбінована розрахункова сітка, побудована за допомогою сіткового генератора ANSYS

Mesh. Розрахункова сітка є комбінацією тетраедричних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущування розрахункової сітки біля твердих стінок, що обмежують канали розрахункової моделі. При побудові розрахункової сітки було використано локальні згущування комірок у вузьких проміжках, що дозволило при досить невеликій кількості елементів в області основного осового потоку отримати детальну сітку в каналах перфорації і в областях поблизу твердих стінок. З метою зменшення кількості комірок розрахункової сітки згущення комірок на верхній поверхні основного каналу не задавалося. При побудові локального згущення розрахункової сітки в пристінній області для забезпечення високої якості комірок при побудові сітки в CFX Mesh рекомендується використовувати функцію Smooth Transition, що дозволяє зменшити спотворення сіткових комірок поблизу гострих кутів розрахункової області.

В розрахунках була використана SST – модель турбулентної в'язкості, яка показала надійні результати в стаціонарних умовах. Кількість вузлів і товщина області пристінного згущення розрахункової сітки обиралися з умови забезпечення значення параметра $y^+ \leq 2$ в усьому дослідженому діапазоні. Тестові розрахунки показали, що в області біля твердої стінки згущення має складати 15...20 комірок, збільшення ж кількості комірок до 30...40 не призводить до суттєвого збільшення точності розв'язків.

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідають значенням параметра вдуву близьким до $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$. Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 20 °С, температура вторинного потоку – 80 °С. У розрахунках був прий-

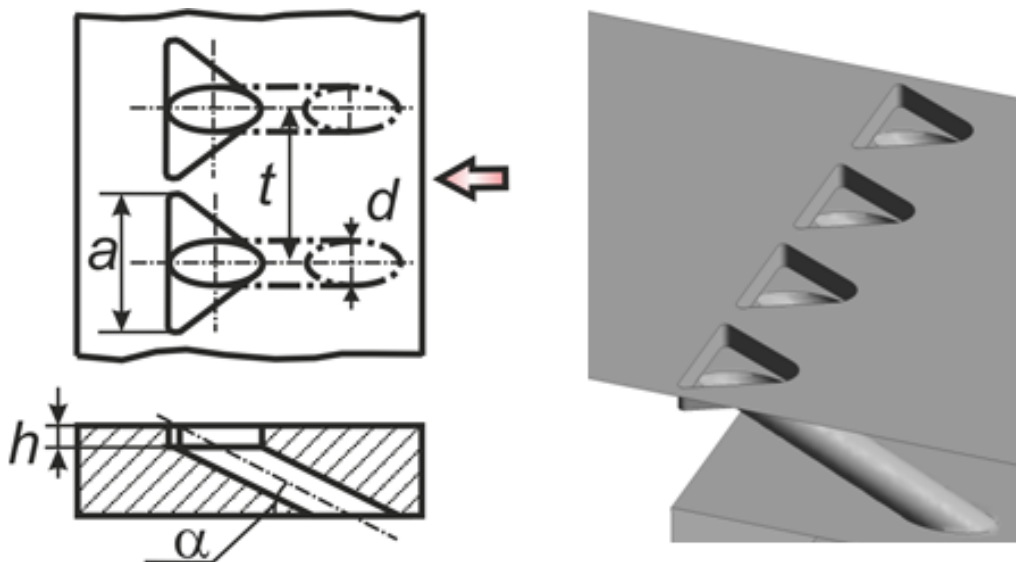


Рис. 1. Досліджений спосіб плівкового охолодження: трикутні кратери.

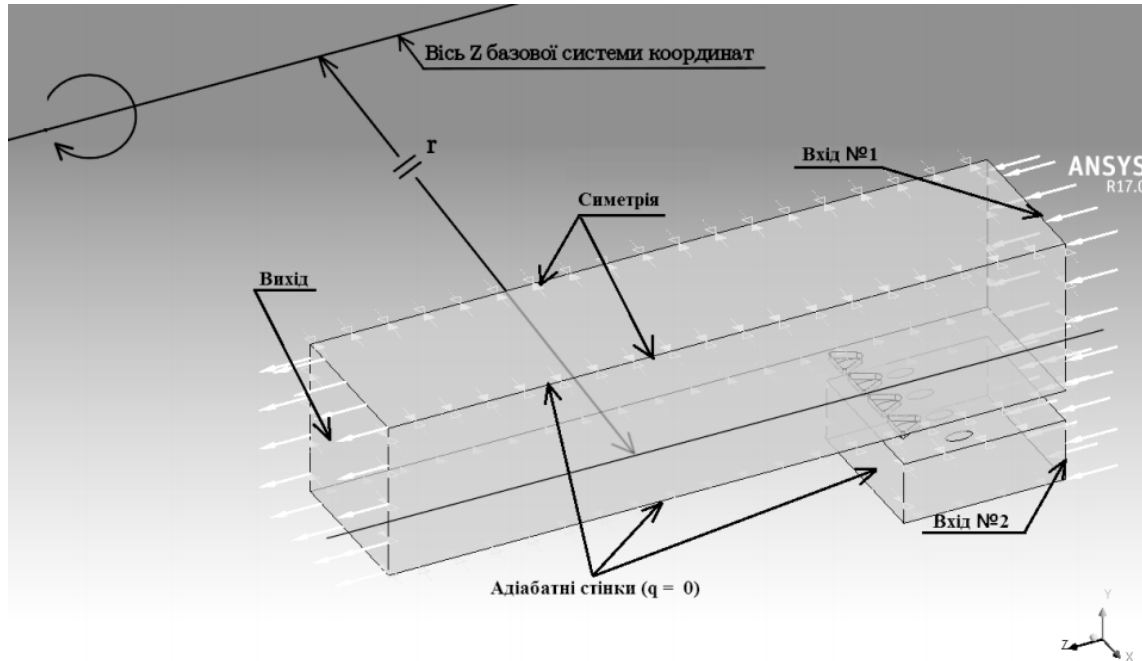


Рис. 2. Геометрична 3D-модель плівкового охолодження.

нятий низький рівень інтенсивності турбулентності основного потоку ($Tu = 1,0\%$). Тверді межі розрахункової області задані як адіабатні стінки ($q = 0$); на бічних поверхнях розрахункової моделі задані умови симетрії.

В якості параметра, що характеризує вплив обертання на ефективність плівкового охолодження використовувалось число Россбі, яке є відношенням між силою інерції і силою Кориоліса $Ro = \pi n r / 30 w_1$, де n – частота обертання (об/хв). Для визначення меж впливу коріолісових та відцентрових сил визначимо критичне значення параметру Ro , тобто при яких частотах обертання параметр Ro буде рівним 1.0. При $Ro < 1.0$ переважний вплив матимуть коріолісові сили, при $Ro > 1.0$ – відцентрові. Критичне значення параметру Ro досягається при частоті обертання рівній 883 об/хв. Тому для

дослідження впливу коріолісових сил дослідження проводились при частотах вращения 10 та 100 об/хв, для дослідження відцентрових сил – при частотах 3000, 5000 и 7000 об/хв.

Результати дослідження та їх аналіз

Вплив коріолісових сил. Дослідження впливу сили Кориоліса відбувалось при частотах обертання 10 та 100 об/хв, тобто при параметрах обертання Ro 0.01 та 0.11 відповідно. Далі приведені порівняння при параметрах вдуву $m = 1,5$.

На рис. 3 показана візуалізація ліній току основного потоку. У стаціонарних умовах при видуві в трикутні заглиблення основний потік майже не зміщується з охолоджувачем. З рисунку можна зробити висновок, що дія коріолісових сил не спричиняє викривлення ліній току

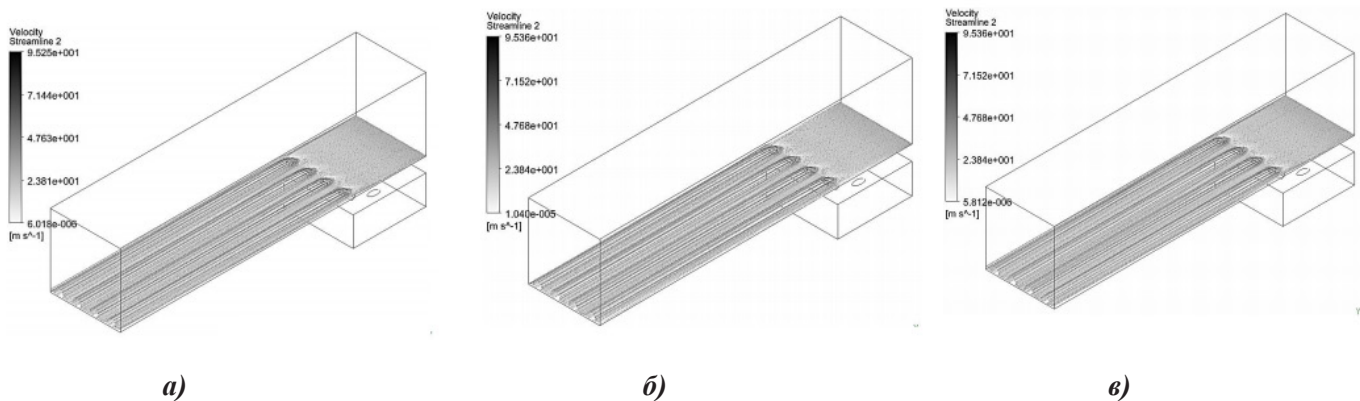


Рис. 3. Лінії току основного потоку: а – $n = 0$; б – $n = 10$; в – $n = 100$ об/хв.

основного потоку по усій довжині пластини, а тому і не викликає змішування потоків.

Важливою особливістю схеми з використанням трикутних кратерів є висока рівномірність плівкового охолодження у поперечному напрямку. При вдуві в трикутні кратери плівка охолоджувача майже повністю покриває плоску поверхню. Вплив коріолісової сили на адіабатну ефективність можна оцінити на рис. 4, де зображені локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень x/d і різних значень параметру обертання. На графіках не спостерігається зміщення піків ефективності плівкового охолодження в результаті обертання охолоджувальної поверхні. З чого можна зробити висновок, що сила Коріоліса практично не впливає на локальну адіабатну ефективність.

Розглянемо кількісні значення впливу обертання на адіабатну ефективність. Порівняння осередненої по поверхні (для кожного значення m) адіабатної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів обертання представлено на рис. 5. Як видно з рисунку, особливість схеми плівкового охолодження з вдувом в трикутні кратери, а саме: зростання осередненої по поверхні адіабатної ефективності плівкового охолодження зі збільшенням параметра вдуву до значення $m = 2,0$, має місце при усіх досліджених параметрах обертання. Крім того, при $Ro < 0,1$ спостерігається зменшення осередненої по поверхні адіабатної ефективності плівкового охолодження у порівнянні зі стаціонарними умовами лише на 2%.

Вплив відцентрових сил. Дослідження впливу відцентрових сил відбувалось при частотах обертання

3000, 5000 та 7000 об/хв, тобто при параметрах обертання $Ro = 3,39; 5,65; 7,92$ відповідно.

На рис. 6 наведена візуалізація ліній току основного потоку. Дія відцентрових сил спричиняє викривлення ліній току основного потоку. Причому при збільшенні частоти обертання збільшується і викривлення ліній току.

На рис. 7 зображені локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень x/d і різних значень параметру обертання. На графіках спостерігається зміщення піків ефективності плівкового охолодження в результаті обертання охолоджувальної поверхні. Для частоти обертання 3000 об/хв помітне зміщення спостерігається лише при $x/d > 15$, для 5000 об/хв – при $x/d > 10$, для 7000 об/хв – при $x/d > 3$.

Перейдемо до кількісних показників значення впливу обертання на адіабатну ефективність. Порівняння осередненої по поверхні (для кожного значення m) адіабатної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів обертання представлено на рис. 8. Як видно з рисунку, зі збільшенням параметру вдуву до $m = 2,0$, осереднена по поверхні адіабатна ефективність плівкового охолодження збільшується при усіх досліджених параметрах обертання. Дія відцентрової сили викликає зменшення осередненої адіабатної ефективності плівкового охолодження на 2–7%, причому найбільший вплив на ефективність плівкового охолодження спостерігається зі збільшенням параметру обертання до $n = 7000$ об/хв.

Важливим також є те, що при малих значеннях параметру вдуву величина відцентрових сил, діючих як на

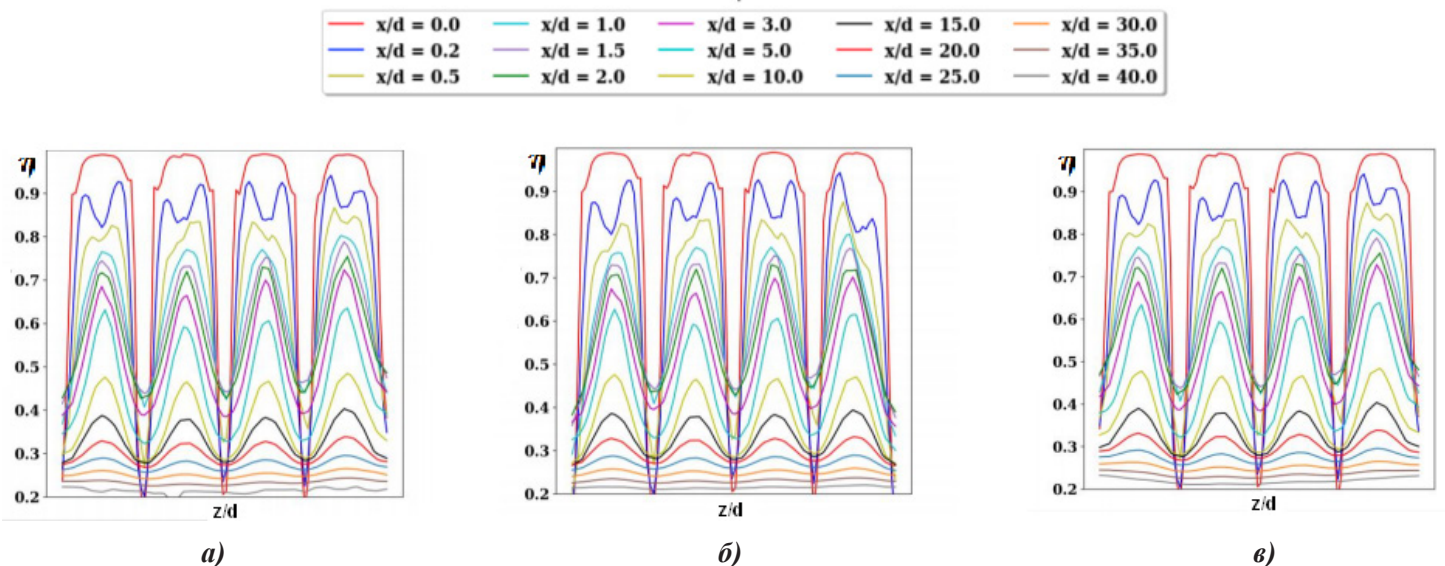


Рис. 4. Локальні значення ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині: а – $n = 0$; б – $n = 10$; в – $n = 100$ об/хв.

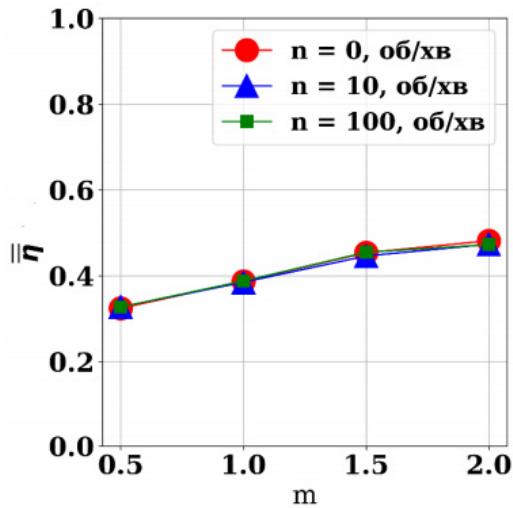


Рис. 5. Осереднена по поверхні ефективність плівкового охолодження.

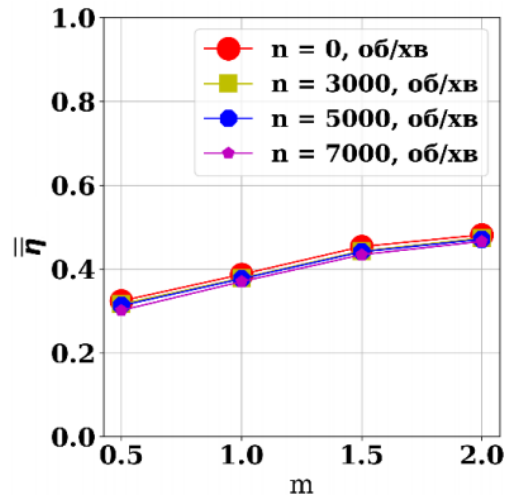
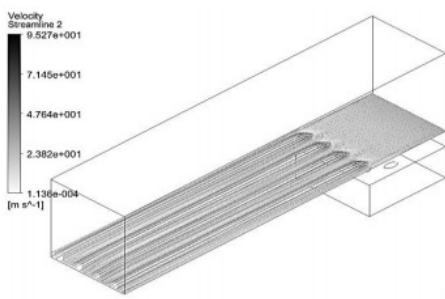
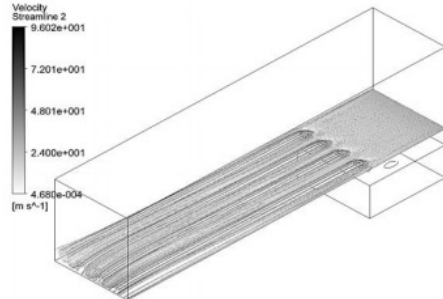


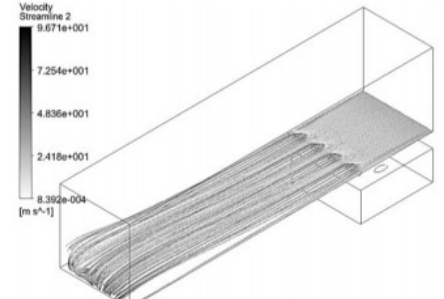
Рис. 8. Осереднена по поверхні ефективність плівкового охолодження.



а)

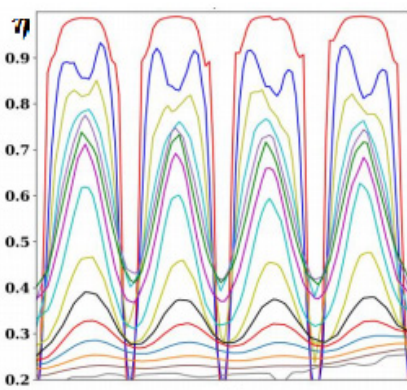
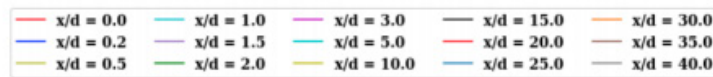


б)

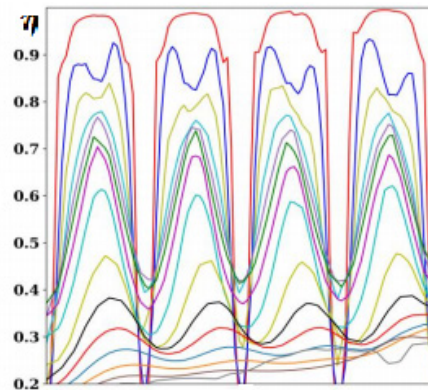


в)

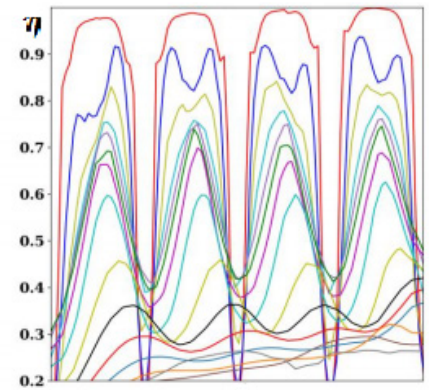
Рис. 6 Лінії току основного потоку: а – $n = 3000$; б – $n = 5000$; в – $n = 7000$ об/хв.



а)



б)



в)

Рис. 7. Локальні значення ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині: а – $n = 3000$; б – $n = 5000$; в – $n = 7000$ об/хв.

струмені охолоджувача, досить мала, внаслідок малої витрати повітря через отвори плівкового охолодження. З ростом параметру вдуву росте секундна маса охолоджувача, що видувається через отвори плівкового охолодження, отже, збільшується і величина відцентрових сил, діючих на струмені, що призводить до їх більшого відхилення від осевого напрямку. При високих значеннях параметру вдуву ($m > 1.5$) збільшується секундна маса охолоджувача на виході з отворів плівкового охолодження, але одночасно істотно зростає величина інерційних сил, діючих на елементарні об'єми охолоджувача в струменях, що, кінцем кінцем, призводить до деякого зменшення величини відхилення струменів від осевого напрямку.

Висновки

Результати дослідження фізичної структури та ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача в трикутні заглиблення в умовах обертання поверхні показали, що дії коріолісових та відцентрових сил мають різний характер. Сила Коріоліса практично не впливає на фізичну структуру потоку, осереднені по поверхні та локальні значення адіабатної ефективності охолодження. Відцентрові сили значною мірою впливають на фізичну структуру потоку викликаючи деформації форми вихрових структур та ліній току, спостерігається зміщення піків ефективності охолодження у поперечному напрямку; осереднена по поверхні адіабатна ефективність плівкового охолодження залишилась майже незмінною, хоча і спостерігається суттєве зміщення піків ефективності плівкового охолодження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bunker Ronald S.* Evolution of turbine cooling// ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, – 2017. – V. 1 Aircraft Engine; Fans and Blowers; Marine; Honors and Awards. Paper 63205. – 26 p.
2. *Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S.* Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Journal of Turbomachinery. – 2009. – V. 131. Paper 011003. – 13 p.
3. *Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D.* Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 5, – pp. 751-757.
4. *Khalatov A.A., Petliak O.O., Panchenko N.A., Severin S.D.* Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples// Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012024 - 6 p.
5. *Пат. 113452 Україна.* Способ пленочного охладж-дення // Халатов А.А., Северин С.Д., Безлюдная М.В., Новохатская И.В.; заявитель и патентообладатель Ин-ститут технической теплофизики НАН Украины. № 201504484; заявл. 07.05.2015; опубл. 04.01.2017, Бюл. № 1. 3 с.: ил.
6. *Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Резник С.Б.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: монография. – Киев: НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Изд-во «Политехника», 2016. – Т. 10: Перспективные схемы пленочного охладж-дення. – 238 с.

FILM COOLING OVER A FLAT PLATE WITH COOLANT SUPPLY INTO TRIANGULAR INDENTATION

Khalatov A.A.^{1,2}, Panchenko N.A.^{1,2}, Petliak O.O.²

¹ Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.01>

The modern high-performance gas turbine engines operate at the flow temperatures exceeding the melting temperature of materials, which require the blade cooling. However, the traditional scheme of film cooling is characterized by appearance of secondary vortex structures that destroy the coolant film. From the existing alternative schemes of film cooling, which allow protecting the turbine blades from influence of high temperatures, the scheme with triangular dimples has demonstrated good results in the stationary conditions. This cooling scheme was patented and tested in the Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. In order to determine the feasibility of such a scheme, it is necessary to consider the effect of the blade rotation influencing the film cooling efficiency. The results are given towards theoretical investigation of the film cooling efficiency of this scheme under rotation conditions. The study was performed using the ANSYS CFX package using SST-turbulence model. The blowing ratio was varied from 0.5 to 2.0. Numerical simulation performed for rotation parameters corresponding to the dominant influence of the Coriolis force – 10, 100 rpm, and centrifugal forces – 3000, 5000 and 7000 rpm. On the basis of computer simulation, it has been shown that rotation does not affect weakly the average efficiency of film cooling at Coriolis force, but causes a peak displacement of local adiabatic efficiency, at rotation parameter of 7000 rpm, when there is a distortion of the flow lines.

References 6, figures 8.

Key words: film cooling, triangular surface dimples, blowing ratio, rotational parameter, film cooling effectiveness, numerical simulation.

1. Bunker Ronald S. Evolution of turbine cooling// ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2017. V. 1 Aircraft Engine; Fans and Blowers; Marine; Honors and Awards. Paper 63205. 26 p.

2. Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Journal of Turbomachinery. 2009. V.131. Paper 011003. 13 p.

3. Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D. Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 5, pp. 751–757.

4. Khalatov A.A., Petliak O.O., Panchenko N.A., Severin S.D. Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples// Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012024. 6 p.

5. Patent 113452 Ukraine, Film-cooling technique // A.A. Khalatov, S.D. Severin, M.V. Bezlyudnaya, and I.V. Novokhatskaya; Applicant and Patent Holder – Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, No. 201504484; application date 05.07.2015; publication date 01.04.2017, Bulletin No. 1. (in Ukr.)

6. Khavaton Artem, Borysov Igor, Dashevskyy Yuri, Reznik Sergiy [Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields] Kyiv: NTUU «KPI», Politechnika, 2016. V. 10: Advanced film cooling schemes. 238 p. (in Rus.)

Отримано 19.07.2018

Received 19.07.2018