

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АДІАБАТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ В СТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ ТА УМОВАХ ОБЕРТАННЯ

О. О. Петляк¹, А. А. Халатов^{1, 2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

В роботі представлено порівняння адіабатної ефективності плівкового охолодження схеми з подачею охолоджувача в поверхневі заглиблення трикутної форми в стаціонарних умовах та умовах обертання. В якості об'єкту дослідження використана однорядна схема з відносним кроком 3, відповідним реальним умовам роботи систем охолодження лопаток газових турбін, параметр вдуву змінювався від 0.5 до 2.0, параметр обертання – 0.01 до 7.92. В якості метода дослідження виконано чисельне моделювання плівкового охолодження на плоскій пластині у комерційному програмному забезпеченні Ansys CFX 17. Результати дослідження показали, що при параметрах обертання менших за 0.1 умови обертання не впливають на середню адіабатну ефективність плівкового охолодження, при параметрах обертання більших за 7.92 ефективність зменшується у середньому на 5 % – 10 %.

Ключові слова: плівкове охолодження, адіабатна ефективність плівкового охолодження, трикутні поверхневі заглиблення, параметр обертання

Вступ

Підвищення температури газу перед турбіною є головним напрямом збільшення ефективності ГТД та ГТУ. В сучасних газотурбінних двигунах температура робочого тіла на виході із камери згоряння досягає 1500 - 1800 °C, що виходить за межі робочих температур конструкційних матеріалів лопатки [1]. Тому при високих значеннях температури газу для забезпечення працездатності лопаток ГТ наряду з внутрішнім конвективним використовується також плівкове (зовнішнє) охолодження. В роботі [2] була наведена порівняльна характеристика плівкового охолодження при використанні двох альтернативних схем: з виводом охолоджувача в траншею і трикутні кратери та традиційної схеми, з одним рядом похилих отворів. Аналіз результатів роботи [2] показує, що середня адіабатна ефективність плівкового охолодження при використанні трикутних кратерів [3] (рис. 1) для параметрів вдуву $m \geq 1.0$ є вищою на 10 ... 60 % ніж при використанні традиційної схеми. Розрахунки були проведені в стаціонарній постановці задачі, але ефективність плівкового охолодження в загальному випадку залежить від дуже великої кількості факторів, зокрема: від значення параметра вдуву, відношення щільності охолоджувача і основного потоку (DR), числа Рейнольдса, температурного фактору, чисел Маха основного і вторинного потоків, кривизни охолоджувальної поверхні, градієнта тиску, параметра обертання і ін. Тому для дослідження доцільності викори-

стання альтернативних схем плівкового охолодження треба враховувати і вищеперераховані фактори. З усього різноманіття факторів, в найменшій мірі вивчено вплив турбулентності основного потоку, і ефекту обертання лопатки. В даний час є дуже мало експериментальних робіт, присвячених дослідженню плівкового охолодження лопаток газових турбін в умовах обертання. У зв'язку з цим все більшого значення для теоретичних і практичних цілей набувають методи чисельного моделювання з використанням сучасних комерційних CFD - пакетів.

Тому наступна робота присвячена порівняльному аналізу адіабатної ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні з використанням трикутних кратерів в стаціонарних умовах та в умовах обертання. Дослідження було виконано з використанням комерційного пакету CFD - моделювання ANSYS CFX 17.

1. Постановка задачі

Геометрична модель плівкового охолодження плоскої поверхні з виводом охолоджувача через один ряд отворів в трикутних кратерах (рис. 1) була вико-

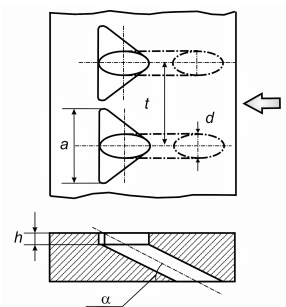


Рис. 1. Геометрія схеми з трикутними заглибленнями [3]

нана в ANSYS Design Manager. Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерних для реальних систем плівкового охолодження лопаток газових турбін і детально описані у роботі [2]. Для забезпечення можливості виконання розрахунків з урахуванням обертання модель після побудови в базовій системі координат YOX була переміщена вздовж базової осі OX на відстань, що відповідає радіусу обертання $r = 400$ мм (рис. 2).

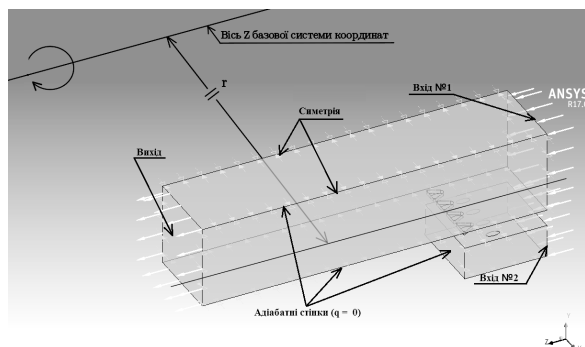


Рис. 2. Геометрична модель схеми з трикутними заглибленнями

Для виконання CFD-моделювання була використана комбінована розрахункова сітка. Локальне пристінкове згущення розрахункової сітки поблизу твердих стінок складалося з 20 сіткових комірок, що для використаної в розрахунках SST – моделі турбулентності забезпечувало зміну параметру y^+ в пристінкових ділянках розрахункової моделі в діапазоні 0.5...1.5.

Граничні умови на вході і виході розрахункової області були задані близькими до реальних умов, які мають місце в системах охолодження лопаток газових турбін. Тверді межі розрахункової області були задані як адіабатні стінки ($q = 0$). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії. Осереднена по Рейнольдсу система рівнянь Нав'є – Стокса вирішувалася для в'язкого теплопровідного газу в нестационарній постановці задачі з використанням повного рівняння енергії. На вході для основного потоку задавався рівномірний розподіл швидкості, для вторинного - витрата повітря.

Граничні умови на двох вхідних областях (рис. 2, області для входу №1, входу №2 і виходу позначені стрілками) задаються відповідними значеннями параметра вдуву $m = 0.5; 1.0; 1.5; 2.0$. Досліджувалась схема зі зворотнім напрямком теплового потоку. Адіабатична ефективність плівкового охолодження визначалась як (1):

$$\bar{\eta} = \frac{i_{\infty}^* - i_{ад.ст}^*}{i_{\infty}^* - i_{охл}^*} \quad (1)$$

де i_{∞}^* , $i_{пл}^*$, $i_{охл}^*$ – повна ентальпія основного потоку, адіабатичної стінки (плівки) та охолоджуючого повітря відповідно.

Вплив ефекту обертання на ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні був досліджений

при частотах обертання $n = 0, 10, 100$ та 7000 об/хв. В якості параметра, що характеризує вплив обертання на теплогидравлічні характеристики систем охолодження використовують число Россбі, яке є відношенням між силою інерції і силою Коріоліса та визначається наступним чином (2):

$$Ro = \frac{\Omega r}{w_z} \quad (2)$$

де Ω - кутова швидкість обертання охолоджувальної поверхні; r - радіус осі обертання; w_z - швидкість основного потоку в каналі.

Мале число Россбі - ознака системи, яка схильна до значного впливу сили Коріоліса, велике число Россбі - ознака системи, в якій домінує відцентрова сила.

Якщо врахувати, що кутова швидкість обертання визначається як $\Omega = \pi n / 30$, то можна отримати вираз для параметра обертання не через кутову швидкість обертання, а через частоту обертання (3):

$$Ro = \frac{\pi n r}{30 w_z} \quad (3)$$

де n - частота обертання (об/хв).

Надалі, параметром обертання будемо вважати величину, яка визначається виразом (3). Граничні умови наведені в табл. 1. Для кожного з параметрів обертання були проведені розрахунки при різних значеннях параметрів обертання з табл. 2.

Табл. 1. Граничні умови

Область	Вхід №1	Вхід №2	Вихід
Середня швидкість, (м/с)	37	-	-
Статична температура, (C)	20	80	-
Витрата, кг/с ($m = 0.5$)	-	0.000031	-
Витрата, кг/с ($m = 1$)	-	0.000067	-
Витрата, кг/с ($m = 1.5$)	-	0.000107	-
Витрата, кг/с ($m = 2.0$)	-	0.000143	-
Статичний тиск, Па	-	-	101315

Для оцінки впливу ефекту обертання на адіабатну ефективність плівкового охолодження будемо використовувати наступний параметр (4):

$$\varepsilon_{оберт} = \frac{\bar{\eta}_{оберт}}{\bar{\eta}_{стат}} \quad (4)$$

де $\bar{\eta}_{оберт}$, $\bar{\eta}_{стат}$ - середні за перетином значення адіабатної ефективності плівко-

Табл. 2. Досліджені параметри обертання

n , об/хв	Ro
0	0
10	0.01
100	0.1
7000	7.92

вого охолодження в умовах обертання і в стаціонарних умовах відповідно.

2. Результати та обговорення

Аналіз результатів показав, що в умовах обертання під дією відцентрових та коріолісових сил відбувається викривлення потоку. На рис. 3 представлені локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині для різних параметрів обертання відповідно до значень в табл. 2 (тут і далі приведені порівняння при параметрах $m = 1,5$ і $x/d = 2,0$, якщо не будуть вказані інші параметри).

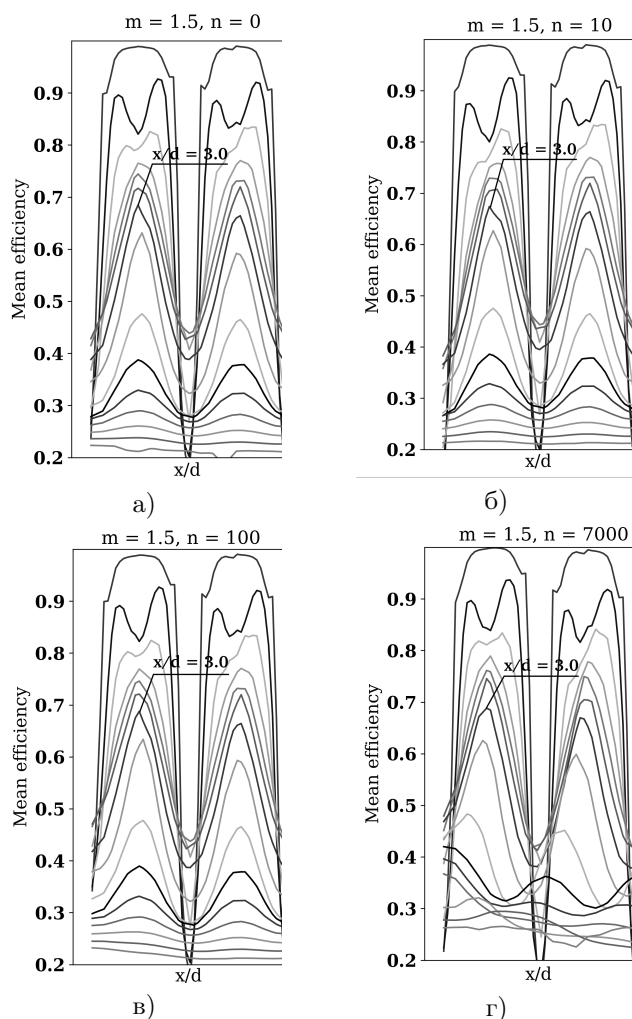


Рис. 3. Локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині: а) $n = 0$, ($Ro=0$); б) $n = 10$, ($Ro=0.01$); в) $n = 100$, ($Ro=0.1$); г) $n = 7000$, ($Ro=7.92$) об/хв.

З рисунку видно, що при малих параметрах обертання, $Ro < 0.1$, дія коріолісових сил не впливає на рівномірність розподілу охолоджуючого повітря. При збільшенні ж параметру обертання до $Ro > 7$, дія відцентрових сил призводить до викривлення потоку в напрямку протилежному до напрямку обертання, що проявляється на графіках у вигляді зміщення піків ефективності плівкового охолодження вже при $x/d > 3.0$.

Розглянемо кількісні показники впливу обертання на адіабатну ефективність. Порівняння осередненої по поверхні (для кожного значення m) адіабатної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів обертання представлено на рис. 4. Як видно з рисунку, особливість схеми плівкового охолодження з видувом в трикутні кратери, а саме: зростання адіабатної ефективності плівкового охолодження зі збільшенням параметра вдуву до значення $m=2,0$, має місце при усіх досліджених параметрах обертання. При $Ro > 7$ спостерігається зменшення осередненої по поверхні адіабатної ефективності плівкового охолодження у порівнянні за стаціонарними умовами на 5 %. Як було зазначено вище, під дією відцентрових сил відбувається суттєве викривлення потоку, тому для практичних задач є необхідним також дослідження локальних значень адіабатної ефективності плівкового охолодження.

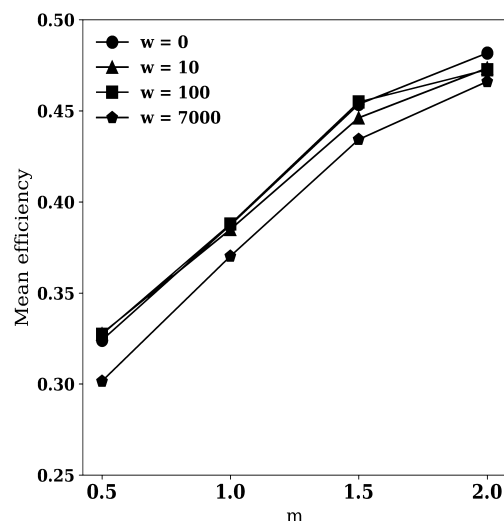


Рис. 4. Осереднена по поверхні адіабатна ефективність плівкового охолодження

На рис. 5 представлені залежності середньої в поперечному напрямку адіабатної ефективності плівкового охолодження в умовах обертання для трьох значень швидкостей обертання та різних параметрів вдуву. На рис. 6 представлені відповідні їм залежності параметра $\varepsilon_{оберт}$ по довжині пластини.

З рисунків видно, що при $Ro = 0.01 - 0.1$, $\varepsilon_{оберт} \approx 1$, з чого можна зробити висновок, що обертання пластини не суттєво впливає на середню за перетином адіабатну ефективність плівкового охолодження для усіх значень параметру вдуву. При $Ro = 7.2$, відбувається зменшення ефективності плівкового охолодження на 10 %. Важливим також є те, що при малих значеннях параметру вдуву величина відцентрових сил, діючих на струмені охолоджувача, досить мала, внаслідок малої витрати повітря через отвори плівкового охолодження. Для параметру вдуву $m = 0.5$ ефективність плівкового охолодження при $x/d > 7.0$ вища ніж при $m \geq 0.5$. З ростом параметру вдуву росте секундна маса охолоджувача, що видувается

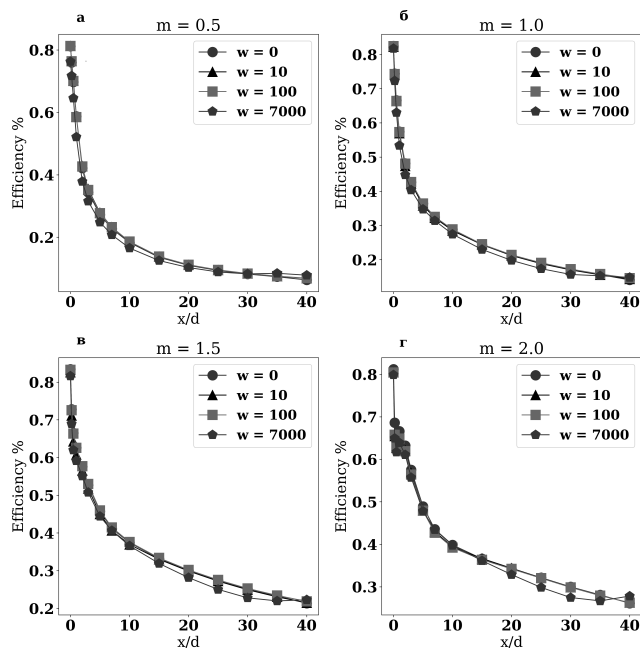


Рис. 5. Залежність середньої в поперечному напрямку адиабатної ефективності в умовах обертання при: а) $m = 0.5$, б) $m = 1.0$, в) $m = 1.5$ г) $m = 2.0$

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, кінцево, призводить до деякого зменшення величини відхилення струменів від осевого напрямку.

3. Висновки

Виконаний аналіз показав, що умови обертання при видуві охолоджувача в трикутні кратери впливають наступним чином:

- 1) При малих параметрах обертання: $n = 10, 100$, тобто при $Ro = 0.01 - 0.1$, обертання пластини не впливає на фізичну структуру потоку та на адиабатну ефективність плівкового охолодження при усіх значеннях параметру вдуву.
- 2) При великих параметрах обертання: $n = 7000$, тобто при $Ro = 7.2$, обертання пластини спричиняє зміну адиабатної ефективності плівкового

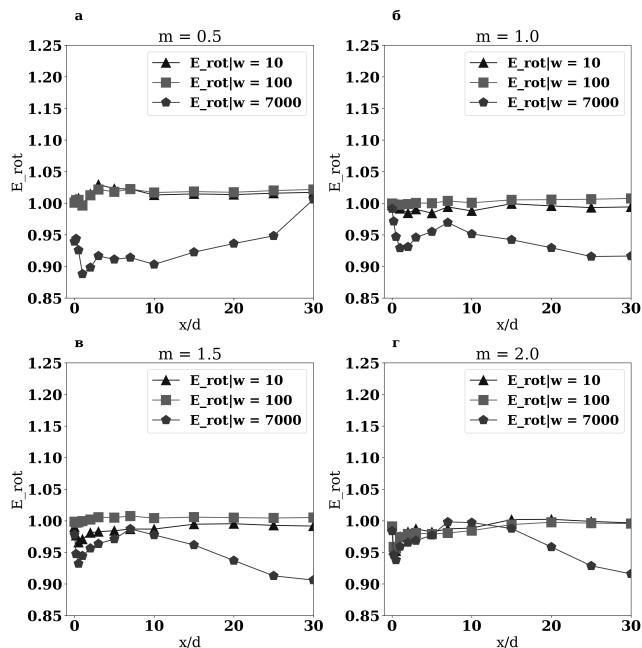


Рис. 6. Залежність параметра $\varepsilon_{обрт}$ по довжині пластини при: а) $m = 0.5$, б) $m = 1.0$, в) $m = 1.5$ г) $m = 2.0$

охолодження при усіх значеннях параметру вдуву. Осереднена по поверхні адиабатна ефективність плівкового охолодження зменшується на 5 %. Середня за перетином адиабатна ефективність плівкового охолодження зменшується на 5 % - 10 %. Найбільший вплив відцентрових сил спостерігається при $m \geq 1.0 - 1.5$.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил, Т. 7. — 2008. — 292 с.
2. Khalatov A. A., Petliak O. O., Severin S. D., Panchenko N. A. Comparative analysis of film cooling efficiency at coolant supply into a single array of triangular dimples. — 2018. — 7 p.
3. Khalatov A. A., Severin S. D., Bezludna M. V. and Novohatska I. V. Method for improving the cooling effectiveness of a gaseous coolant stream which flows through a substrate, and related articles of manufacture— US Patent №113452, 2017.— 18 p.