

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА В СИСТЕМУ ПОВЕРХНЕВИХ НАПІВСФЕРИЧНИХ ЗАГЛИБЛЕНЬ

І.М. Северін¹, М.В. Безлюдна^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Виконано чисельне моделювання плівкового охолодження на плоскій пластині при подачі охолоджувача через один ряд отворів в напівсферичних заглибленнях, розташованих з поперечним кроком $3d$. Наведені порівняння ефективності охолодження з даними традиційного плівкового охолодження та експериментальними результатами. Для чисельного моделювання було використано комерційне програмне забезпечення Ansys CFX 15.

Ключові слова: плівкове охолодження, напівсферичні отвори, ефективність охолодження

Вступ

Добре відомо, що коефіцієнт корисної дії газової турбіни сильно залежить від температури на вході в турбіну. В сучасних газотурбінних двигунах температура робочого тіла на виході із камери згоряння досягає $1800 - 2200^\circ \text{K}$, що виходить за межі робочих температур конструкційних матеріалів лопатки.

Таким чином, щоб підтримувати прийнятний термін служби і стандарти безпеки, структурні елементи повинні бути захищені від термічної дії навколишнього середовища. Це вимагає ефективної системи охолодження. Однією зі складових сучасних систем охолодження є видув охолоджувача на поверхню, що захищається (плівкове охолодження).

При плівковому охолодженні охолоджувач вводять в прикордонний шар, який відбирають безпосередньо з компресора. Використання даного методу призводить до значних термодинамічних втрат, які можуть перевищити користь від плівкового охолодження [?].

Для забезпечення вищої ефективності використовують альтернативні схеми (видув охолоджувача через профільовані канали, кратери, траншеї, анти-вихрові системи видуву та ін.). Найперспективнішою схемою вважають отвори «віялової» форми [?], дана форма характеризується високою ефективністю, але складною технологією виготовлення. Саме тому необхідно шукати схеми з пониженою витратою охолоджувача, з високими показниками ефективності та простотою у виготовленні.

В роботі представлено чисельне моделювання альтернативної схеми плівкового охолодження плоскої пластини з одним рядом отворів в напівсферичних заглибленнях, розташованих з поперечним кроком $3d$.

Для числового моделювання було використано комерційне програмне забезпечення Ansys CFX 15.

1. Постановка задачі

Геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні з видувом охолоджувача через один ряд напівсферичних заглиблень було виконано в ANSYS Design Manager, розміри моделі наведені на рис. 1.

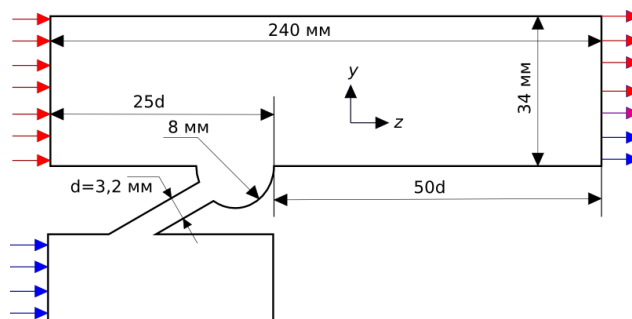


Рис. 1. Геометричні розміри моделі

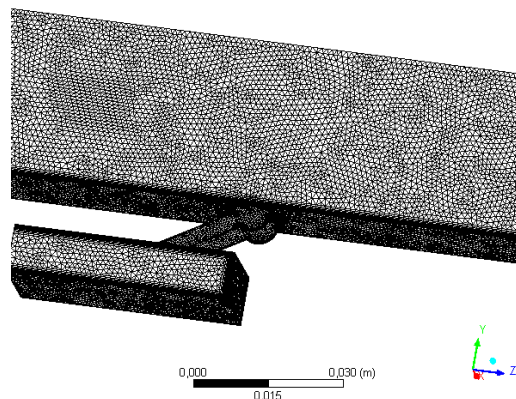


Рис. 2. Розрахункова сітка

Для виконання CFD-моделювання була використана комбінована розрахункова сітка, побудована за допомогою генератора ANSYS CFD Mesh (рис. 2), яка являє собою комбінацію тетрадральних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущення біля твердих стінок, що обмежують канали розрахункової моделі.

Параметри використаної в розрахунках сітки і її розмірності представлені в табл. 1.

Табл. 1. Параметри розрахункової сітки, де № 1 – Осовний потік вдуву, а № 2 – потік вдуву охолоджувача

Вузлів	441569
Елементів	1760829
Тетрадних елементів	1389201
Пірамідальних елементів	395
Клиноподібних елементів	371233

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 стаціонарній постановці задачі з використанням повного рівняння енергії.

На вході для основного потоку задавався рівномірний розподіл швидкості, для вторинного – вихорна повітря.

Граничні умови на двох вхідних областях (рис. 1, області для вдуву і видуву позначені стрілками), що задаються, відповідними значеннями параметра вдуву $m = 0, 5; 1, 0; 1, 5, 2, 0$. Досліджувалась схема плівкового охолодження зі зворотнім напрямком теплового потоку. Дані по граничним умовам наведені в табл. 2.

Адіабатична ефективність плівкового охолодження, з урахуванням, що $C_p = C_p(T)$, відповідно рівняння приймає вигляд:

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

де i_{∞}^* , $i_{ад.ст}^*$, $i_{охл}^*$ – повна ентальпія основного потоку, адіабатичної стінки та охолоджуючого вдуву відповідно.

2. Результати та обговорення

На рис. 3 представлена залежність середньої адіабатної за перетином ефективності (надалі просто середня ефективність) плівкового охолодження від відносної довжини охолоджуваної поверхні при різних значеннях параметра вдуву, що отримана за допомогою пакету ANSYS CFX 15. На виході з поглиблення, найвища ефективність має місце при параметрі вдуву 0,5; далі по потоку ефективність різко

Табл. 2. Граничні умови, де № 1 – Осовний потік вдуву, а № 2 – потік вдуву охолоджувача

Область	№ 1	№ 2
Середня швидкість, m/c	30	–
Статична температура, $^{\circ}C$	15	50
Витрата, $кг/с$ ($m = 0, 5$)	–	$2.95 \cdot 10^{-4}$
($m = 1, 0$)	–	$5.91 \cdot 10^{-4}$
($m = 1, 5$)	–	$8.86 \cdot 10^{-4}$
($m = 2, 0$)	–	$1.18 \cdot 10^{-3}$
Тиск на виході, Pa	101300	

знижується і вже при $x/d > 5$ і $m = 0, 5$ ефективність нижче ніж при $m = 1$. З підвищенням параметра вдуву має місце інший характер зміни ефективності, ніж при $m = 0, 5$, при $m \geq 1$ ефективність по довжині знижується плавно і при значеннях $x/d = 35$ складає близько 0,25...0,3.

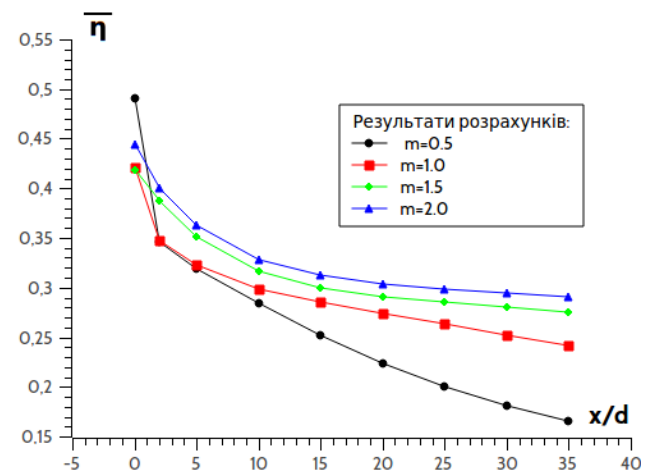


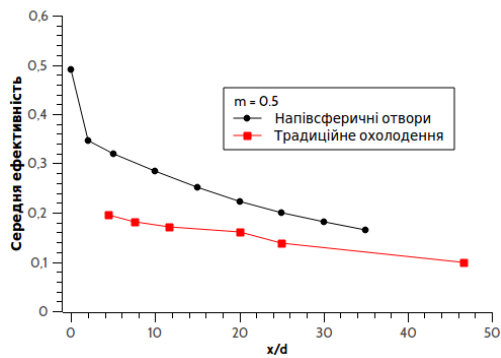
Рис. 3. Середня по поперечному перетину адіабатична ефективність плівкового охолодження

У [?] наводиться середня ефективність плівкового охолодження для одного ряду дискретних круглих отворів з кроком $3d$, розташованих під кутом $\gamma = 35^{\circ}$ з параметрами вдуву 0,5...2,0.

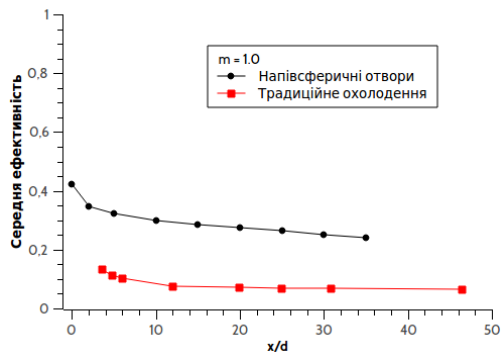
Для традиційних систем охолодження характерним є падіння середньої ефективності на ділянці ($\leq 20d$) і при $m \geq 1$. Це зумовлене тим що відбувається відрив течії, а потім поступова релаксація до постійного рівня (рис. 4).

Таким чином як видно з рис. 4, ефективність для схеми отворів в заглибленнях істотно (при великих параметрах вдуву на початковій ділянці до 4, 5 разів (табл. 3)) перевищує ефективність для схеми отворів без заглиблень. Це відбувається внаслідок того, що поперечний розподіл охолоджувача в лунці знижує його швидкість, і навіть при великих параметрах вдуву не відбувається його відрив від поверхні.

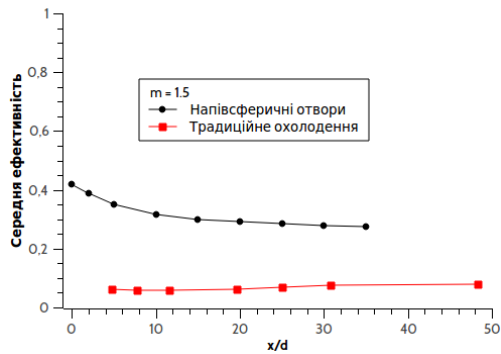
З рис. 4 видно, що при подачі охолоджувача в отвори в напівсферичних поглибленнях з ростом параметра вдуву в діапазоні від 0,5 до 2,0 ефективність плівкового охолодження зростає, в той час як для традиційної схеми отворів циліндричної форми ефективність має максимум при $m = 0, 5$.



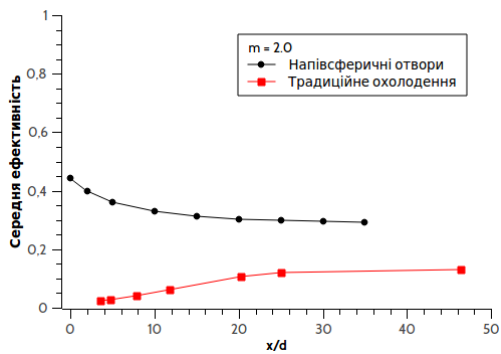
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Порівняння середньої ефективності для різних параметрів вдуву

Табл. 3. Порівняння двічі усередненої ефективності традиційної та розрахункової схеми

m	$\bar{\eta}_{\text{розр.}}$	$\bar{\eta}_{\text{трад.}}$	$\frac{\bar{\eta}_{\text{розр.}}}{\bar{\eta}_{\text{трад.}}}$
0.5	0.274	0.145	1.89
1	0.301	0.083	3.64
1.5	0.323	0.072	4.51
2	0.337	0.087	3.90

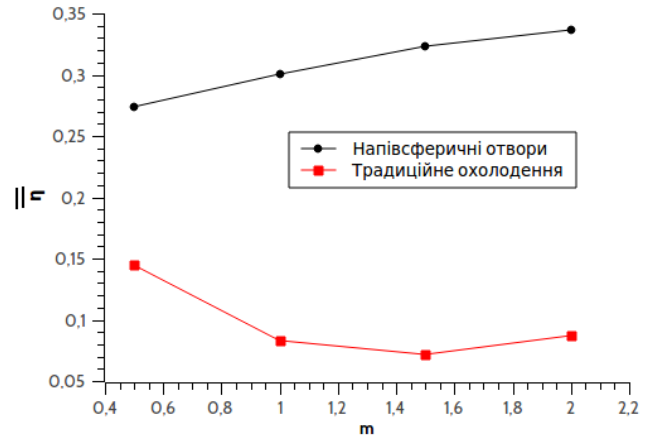


Рис. 5. Двічі усереднена ефективність за перетином для різних параметрів вдуву.

Такий характер залежності $\bar{\eta} = f(z/d, m)$ пояснюється фізичними факторами.

По-перше, наявністю ефекту попереднього розширення струменів на виході з заглиблень, що приводить до їх часткового гальмування.

По-друге, наявністю областей зниженого тиску в ядрах вихорів, які утворюються в порожнинах заглиблень, під основним потоком (рис. 3, б) і перешкоджають відриву струменів від охолоджуваної поверхні. На відміну від того, як це відбувається у випадку звичайного видувача охолоджувача через похилі отвори при великих значеннях параметра вдуву.

У той же самий час, знижений тиск, викликаний вихроутворенням в заглибленнях, призводить до всмоктування в лунки деякої кількості гарячого повітря з прикордонного шару основного потоку. Як

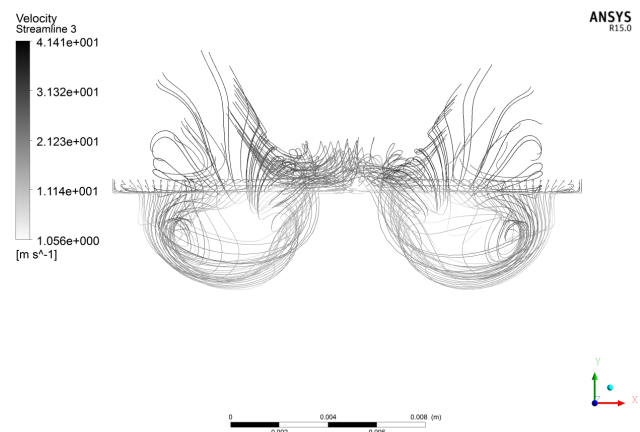


Рис. 6. Лінії току по швидкостям в області заглиблень.

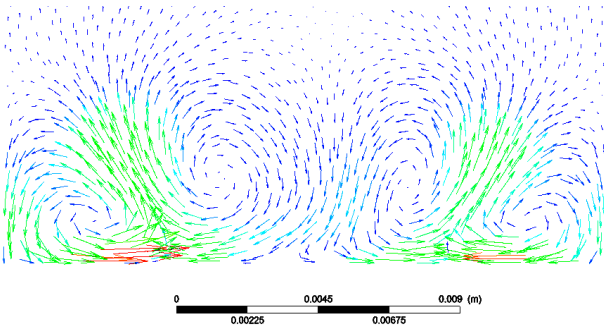


Рис. 7. Розподіл швидкостей в поперечному перерізі на відстані в $3d$ після лунок.

видно з рис. 7 (в якості ілюстрації було використано розподіл швидкостей при $m = 2, 0$, для решти картина якісно лишається такою ж), це призводить до зниження адіабатної ефективності плівкового охолодження на початковій ділянці при збільшенні параметра вдуву, але не робить істотного впливу на ефективність охолодження на основній ділянці в широкому діапазоні значень параметра вдуву.

Висновки

- 1) При збільшенні параметру вдуву, ефективність плівкового охолодження асимптотично зростає, при цьому зона після різкого спаду на початковій ділянці, зі зростанням параметру вдуву середня ефективність прямує до постійного відносно високого значення, при значеннях $x/d = 35$ складає близько 25...30%.
- 2) Середня ефективність плівкового охолодження перевищує традиційну [?] схему місцями до 4.5 рази.
- 3) Наявність заглиблень виключає можливість виникнення відриву течії в межах параметру вдуву 1,0...2,0 і відповідно падіння адіабатичної ефективності на початковій ділянці.
- 4) Судячи з вище сказаного, ми можемо рекомендувати дану схему охолодження як більш ефективну в порівнянні з традиційними схемами.