

ГАЗОВА ЗАВІСА ПРИ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ НАПІВСФЕРИЧНИХ ЗАГЛИБЛЕНЬ: ВПЛИВ ПРИСКОРЕННЯ ПОТОКУ

Д. В. Шурубур¹, І. І. Борисов², А. А. Халатов^{1,2}

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

² Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Наведено результати експериментального дослідження плівкового охолодження плоскої поверхні дворядною системою похилих отворів, розташованих у напівсферичних заглибленнях, в умовах прискорення потоку. Показано, що цей фактор знижує ефективність охолодження, причому зі збільшенням параметра вдуву його вплив зменшується.

Ключові слова: плівкове охолодження, отвори в напівсферичних заглибленнях, ефективність, прискорення потоку

Вступ

Газова завіса широко застосовується для захисту лопаток сучасних високотемпературних газових турбін. На даний час найбільш широке розповсюдження отримали системи подачі охолоджувача через ряди похилих циліндричних отворів. Однак, ефективність цих систем суттєво знижується при параметрах вдуву, більших за одиницю, внаслідок утворення вихрових структур, які руйнують плівку охолоджувача та сприяють підсосу гарячого потоку до поверхні. Тому значні зусилля спрямовуються на пошук нових систем плівкового охолодження, які забезпечують зниження відривних явищ та покращують просторову рівномірність газової завіси.

Серед різноманітних способів підвищення ефективності газової завіси з одночасним покращенням рівномірності покриття поверхні найбільший позитивний ефект забезпечується при використанні фасонних отворів. Однак, виготовлення таких отворів, які мають розміри менш ніж один міліметр, потребує спеціального коштовного устаткування та пов'язане з певними технологічними складнощами. Тому великий практичний інтерес представляють нові технічні рішення, які не поступаються складним (фасонним) отворами по ефективності газової завіси, однак мають більш просту технологію виготовлення.

Перспективним напрямом удосконалення систем плівкового охолодження є подача вторинного повітря у системи «мілких» заглиблень, яка дозволяє значно підвищити ефективність та рівномірність газової завіси. Одним із таких варіантів є застосування заглиблень напівсферичної форми [1].

Для реальних умов експлуатації лопаток газових турбін характерна наявність значної кількості різноманітних факторів, серед яких поздовжній градієнт тиску основного потоку є одним із основних. Характер впливу цього фактору на ефективність газової завіси для різних схем вдуву є неоднозначним. Так,

для щільного вдуву прискорення потоку знижує ефективність ([2]); для вдуву через системи похилих циліндричних отворів наявність прискорення підвищує ефективність на початковій ділянці завіси, та знижує – на основній ([3]); для систем фасонних отворів при наявності поздовжнього від'ємного градієнта ефективність знижується, але у меншому ступені, ніж для щільного вдуву ([4]). Таким чином, вивчення впливу цього фактору на ефективність газової завіси є актуальною науковою та прикладною задачею.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу прискорення основного потоку на ефективність газової завіси з подачею вторинного повітря у дворядну систему напівсферичних заглиблень. Дослідження виконано в широкому діапазоні змінення параметра вдуву ($m = 0,5 \dots 2,5$).

1. Експериментальна установка

Експериментальна установка представляє собою аеродинамічну трубу відкритого типу, яка працює від відцентрового вентилятора ВВД-5. Основний потік повітря подавався до ресиверу і далі у робочу ділянку. Рівномірне по перетину поле швидкості на вході у робочу ділянку забезпечувалось соплом, спроектованим по профілю Витошинського, з відношенням вхідної та вихідної площ 12 : 1. Після робочої ділянки основний потік повітря виходив у заспокійливу ємність і далі – у атмосферу. Вторинне повітря від компресора через регулюючий вентиль, витратомір (ротаметр) та електронагрівач подавався до робочої ділянки через дворядну систему похилих отворів.

Робоча ділянка (рис. 1) представляє собою плоский канал з перетином 294×34 мм, який відповідає вихідному перетину сопла Витошинського. Нижня стінка робочої ділянки включає пластину з оргскла з отворами вдуву, та адіабатну пластину з асбоце-

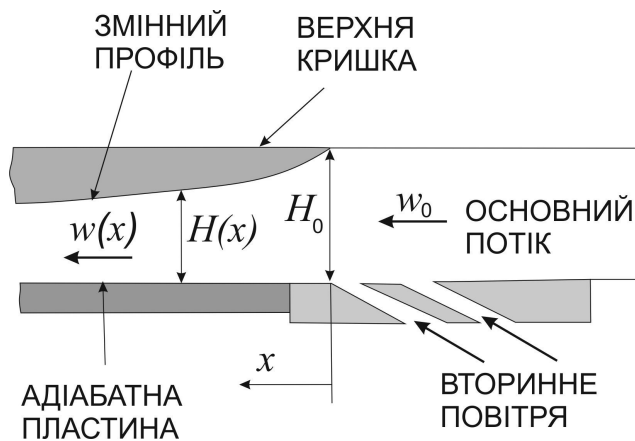


Рис. 1. Схема робочої ділянки

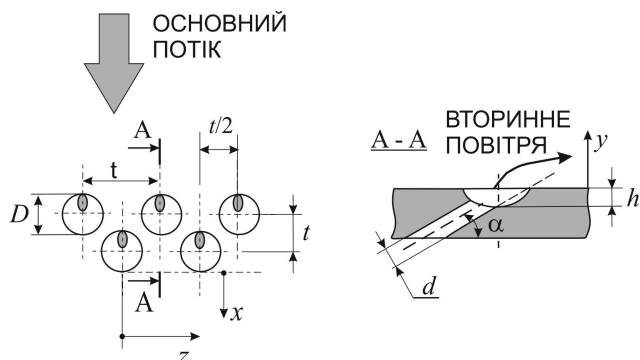


Рис. 2. Схема подачі вторинного повітря

менту ($\lambda = 0,17$ Вт/мК), у яку вмонтовано ряд хромель-алюмелевих термопар, розташованих у поперечному напрямку на одній лінії з постійним по довжині кроком (10мм). В установці передбачена можливість переміщення пластины у поперечному напрямку.

Для визначення температури вторинного потоку термопари було встановлено у двох отворах вдуву, безпосередньо перед виходом з них. Показники цих термопар в процесі експериментів були практично ідентичними (відмінність не перевищувала $0,5^\circ$), тобто розподілення вторинного потоку по ширині було практично рівномірним.

Термопари виготовлялись з проволочки діаметром 0,1мм.

В експериментах використовувались два змінних профілі для формування прискореного потоку, які встановлювались на верхню стінку каналу.

Профілі №1 та №2 забезпечували звуження перетину каналу до виходу відповідно у півтора та два рази. Вони проектувались таким чином, щоб параметр прискорення $K = \frac{\nu_\infty dw_\infty}{w_\infty^2 dx}$ відповідав реальним умовам течії у між лопатковому просторі газової турбіни: загалом забезпечувалось змінення величини K від $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $3,5 \cdot 10^{-6}$ до виникнення умов «зворотного» переходу потоку. При розрахунку ефективності охолодження координата « x » відлічувалась від «зрізу» заглиблення.

Експерименти виконано з дворядною системою похилих ($\alpha = 30^\circ$) отворів, розташованих у напівсферичних заглибленнях (рис. 2).

Діаметр отвору d складав 3,2мм, діаметр заглиблення D дорівнював 8мм, глибина $h = 4$ мм ($h/D = 0,5$), поперечний крок заглиблень $t = 16$ мм ($t/d = 5$), а поздовжній $t_1 = 8$ мм ($t_1/d = 2,5$). Нижня лінія проекції отвору на площину xy проходила через край заглиблення.

Для порівняння були також проведені експерименти з дворядною системою похилих циліндричних отворів аналогічної геометрії. Для даного варіанта координата « x » відлічувалась від «зрізу» отвору.

Для дослідження ефективності плівкового охолодження обрано зворотний напрям теплового потоку: основний потік – холодний, а вторинний – нагрітий. В експериментах вимірювались швидкісний напір основного потоку, статичний тиск на верхній стінці каналу, температура основного потоку, температура та витрата вторинного потоку, температура адіабатної поверхні в різних точках по довжині пластины. Швидкісний напір в основному потоку визначався за допомогою трубки Піто-Прандтля та дифманометрів. Для вимірювання статичного тиску застосовувались водяні дифманометри.

Параметри експериментів були наступними: швидкість основного потоку складала $35 \dots 37$ м/с, температура основного потоку змінювалась від 15 до 20°C , вторинного – від 60 до 80°C ; відношення густин вторинного та основного потоків складало $0,85 \dots 0,9$; параметр вдуву змінювався від $0,5$ до $2,5$. Тестові експерименти з вимірювання профілю швидкості основного потоку перед отворами подачі вторинного повітря показали, що для даних умов прилежний шар є близьким до турбулентного (значення формпараметру складало величину приблизно $1,4$).

При оцінці похибок вимірювань використовувались залежності та рекомендації, наведені в [5]. Відносна похибка визначення об'ємної витрати ротаметром складала $\pm 2\%$, масової витрати $\pm 2,8\%$. Абсолютна похибка визначення температури складала $0,4^\circ\text{C}$, відносна похибка вимірювання абсолютної температури складала $\pm 0,14\%$. Відносна похибка визначення параметра вдуву складала $\pm 5,5\%$. Максимальна відносна похибка визначення ефективності газової завіси мала місце в кінці робочої ділянки, її значення не перевищувало $\pm 15\%$. На початковій ділянці похибка була меншою, і не перевищувала $\pm 5\%$.

2. Результати експериментів

Експерименти показали, що з підвищенням поздовжнього градієнта тиску на початковій ділянці потоку погіршується поперечне перемішування струменів вторинного потоку. Це пов'язано зі стабілізуючим впливом прискорення, яке знижує турбулентність. При подальшому розвитку течії цей фактор нівелюється.

Вплив прискорення потоку на усереднену в поперечному напрямку ефективність дворядної системи отворів у напівсферичних заглибленнях суттєво залежить від параметра вдуву (рис. 3). При найменшому з досліджених значень параметра вдуву

$m = 0,5$ від'ємний поздовжній градієнт тиску при $x/d = 20 \dots 30$ знижує ефективність на 15%, причому це зниження на кінцевій ділянці є практично постійним по довжині. При підвищенні параметра вдуву вплив прискорення потоку слабшає, і при цьому залежність від параметра вдуву також зменшується (зниження на $5 \dots 8\%$).

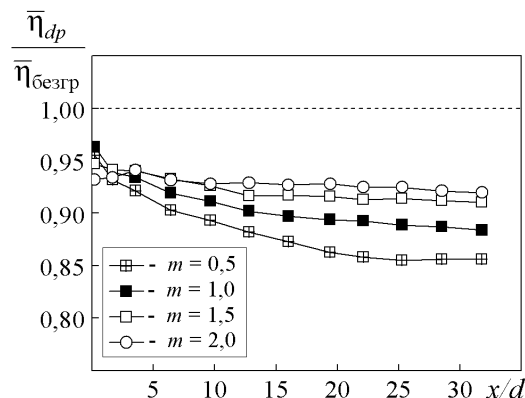


Рис. 3. Відношення ефективності газової завіси для прискореного та безградієнтного потоків для дворядної системи отворів у напівсферичних заглибленнях

При узагальненні даних було використано степеневу залежність відношення осередненої у поперечному напрямку ефективності газової завіси для прискореного та безградієнтного потоків від його відносної швидкості. Вперше таку залежність було запропоновано в роботі [2] для варіанту подачі охолоджувача через щілину, і в подальшому вона показала свою придатність також і для інших способів подачі охолоджувача – через ряди циліндричних та фасонних отворів. Обробка даних проводилась із застосуванням методу найменших квадратів для значення параметра вдуву $m \geq 1$. Результати показано на рис. 4.

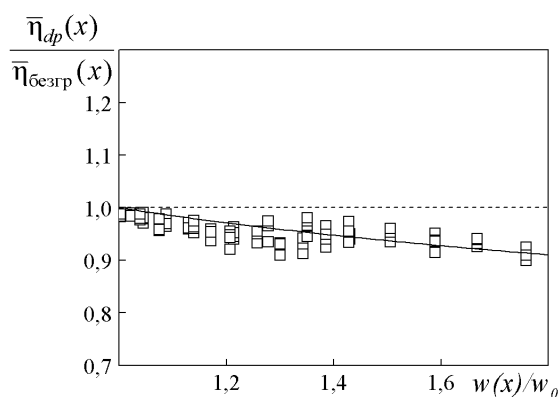


Рис. 4. Залежність відношення значень ефективності для прискореного для безградієнтного потоків від відносної швидкості основного потоку для $m \geq 1$. Лінія – залежність (1)

В результаті було отримано наступне співвідношення, яке апроксимує отримані дані з похибкою $\pm 10\%$:

$$\varepsilon_{dp} = \frac{\bar{\eta}_{dp}(x)}{\bar{\eta}_{безгр}(x)} \left(\frac{w(x)}{w_0} \right)^{-0,16} \quad (1)$$

де w_0 та $w(x)$ – швидкість основного потоку на вході і в перетині x ; $\bar{\eta}_{безгр}$ и $\eta_{dp}(x)$ – ефективність безградієнтного та прискореного потоків в перетині x .

Висновки

Експерименти з вивчення впливу прискорення потоку на ефективність газової завіси при подачі охолоджувача у дворядну систему похилих отворів у напівсферичні заглиблення показали зниження ефективності на всій довжині пластини. Також було показано, що вплив прискорення суттєво залежить від параметра вдуву. Найбільш суттєво ефективність знижується при $m = 0,5$, а при зростанні параметра вдуву вплив прискорення слабшає, і при $m = 2,0$ становить $5 \dots 8\%$. За результатами досліджень запропоновано узагальнююче співвідношення.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А.А., Борисов И.И., Коваленко А.С., Дашевский Ю.Я., Шевцов С.В. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности системой наклонных отверстий, расположенных в сферических углублениях // Промышленная тепло-техника. – 2012. – Т.34 – №.3 – С.5–12.
2. Hartnett J.P., Birkebak R.G., Eckert E.R.G. Velocity distributions, temperature distributions effectiveness and heat transfer in cooling of a surface with a pressure gradient // International Development in Heat Transfer. Trans. ASME, sec. A. 1961. Part 4. P. 682–689.
3. Launder B.E., York J. Discrete-hole cooling in the presence of free stream turbulence and strong favourable pressure gradient // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. – V.17, No 11. – P. 1403–1409.
4. Lutum E., Wolfersdorf J., Semmler K., Dittmar J., Weigand B. An experimental investigation of film cooling on a convex surface subjected to favorable pressure gradient flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. V. 44. P.939–951.
5. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Учебное пособие для студентов высших учеб. Заведений. – Л.: Наука, Ленинградское отделение. – 1967. – 88 с.