

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗА ОТВОРАМИ В ПОПЕРЕЧНІЙ ТРАНШЕЇ: ФАКТОР НЕІЗОТЕРМІЧНОСТІ

С. В. Потапов^{1, а}, Н. А. Панченко^{1,2}

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація

У даній роботі наведені результати комп'ютерного моделювання плівкового охолодження плоскої пластини з подачею вторинного (охолоджуючого) потоку через отвори в поперечній траншеї. Моделювання проводилось за допомогою комерційного програмного пакету ANSYS AIM 19.2. Наведені розрахунки для параметру вдуву в діапазоні від 0,5 до 2,0 та для різних наборів температур: низьких (модельних) та високих (наближених до реальних).

Ключові слова: плівкове охолодження, траншея, фактор неізотермічності, температурний фактор, комп'ютерне моделювання

Вступ

Газотурбінні установки широко використовуються в енергетиці та авіації. Для підвищення подібних установок потрібно збільшувати робочі температури. Однак, через високі температури існує проблема ресурсу устаткування, в тому числі і лопаток турбіни. Для підтримки їх цілостності застосовуються теплозахисні покриття, внутрішнє та зовнішнє охолодження. Одним із рішень є плівкове охолодження, яке інтегрується в конструкцію лопатки. Плівкове охолодження є одним із основних способів зовнішнього охолодження лопаток.

При дослідженні різних перспективних схем широкого попиту набуло комп'ютерне моделювання, так як такий підхід економічно доцільний і не потребує створення реальної експериментальної установки. При цьому отримані результати методом моделювання зазвичай мають невеликі похибки відносно експериментальних даних.

Для оцінки ефективності використовується поняття ефективності охолодження:

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

Де T_{∞}^* – повна температура основного потоку, без врахування охолоджувача, T_{aw} – адіабатична температура поверхні, що захищається, T_2^* – повна температура охолоджувача на виході з отворів [1].

Метою роботи є дослідження ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача через отвори в поперечній траншеї за умов модельних та реальних температур, а також створення порівняльної характеристики.

1. Комп'ютерне моделювання

Числове моделювання плівкового охолодження було виконано з використанням програмного пакету ANSYS AIM 19.2. Дослідження було проведено для моделей, які мають однакову геометрію та розрахункову сітку та різні параметри температур.

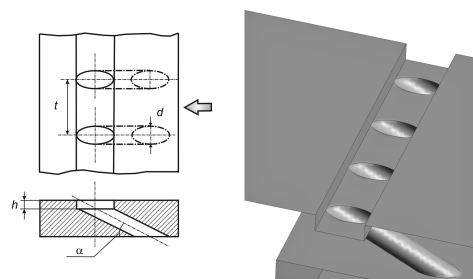


Рис. 1. Досліджений спосіб плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї

Геометрична модель, що досліджується, представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму через отвори вдуву. Схема конфігурації приведена на рис. 1.

Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів, що характерні для реальних систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. Діаметр отвору d складає 0,8 мм, поперечний крок заглиблень $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$), висота траншеї $h = 0,6$ мм ($h/d = 0,75$), кут нахилу отворів до поверхні $\alpha = 30^\circ$.

Досліджувана геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні була виконана в модулі *Geometry* за допомогою інструмента *SpaceClaim*

^аsampotapoff@gmail.com

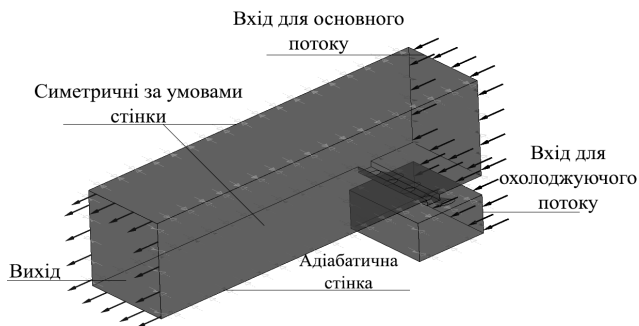


Рис. 2. Геометрія 3D-моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через отвори у траншейному заглибленні

пакету *ANSYS* та представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (пленуму) через отвори вдуву, зображених на рис. 2. Була використана неструктурована комбінована розрахункова сітка, яка була побудована у генераторі *ANSYS Mesh* комбінацією тетраедричних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущення сітки поблизу твердих стінок.

Розміри та густина розрахункової сітки вибиралася з міркувань забезпечення прийнятної часу розрахунку без істотного збитку для точності одержуваних результатів. Прийнятне число вузлів та елементів розрахункової сітки в загальному випадку залежить від розмірів моделі і числа отворів плівкового охолодження. Для дослідженої в даній роботі моделі це число складає 410 тисяч вузлів та 1,27 млн. елементів.

Для дослідження впливу фактору неізотермічності було розглянуто два випадки:

- 1) температура основного потоку – 20°C , температура вторинного потоку – 80°C (використовується обернена теплова схема, що не впливає на точність результату [2]).
- 2) температура основного потоку – 1100°C , температура вторинного потоку – 500°C .

Швидкість основного потоку становила 37 м/с. Співвідношення густин вторинного потоку до основного потоку DR становила 1.76...1.77. Значення інтенсивності турбулентності прийняте за 1%. Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідали значенням параметра вдуву близьким до $m = 0, 5; 1, 0; 1, 5; 2, 0$.

Тверді границі розрахункової області були задані для адіабатної стінки ($\delta Q = 0$). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії.

Дослідження виконувалися з використанням осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (*RANS*) і для замкнення системи рівнянь використовується *SST-модель* турбулентності, яка дає реалістичні розрахунки в пристіночних областях та в розрахункових областях вдаліні від стінок.

2. Результати та аналіз моделювання

Основним параметром для характеристики та аналізу плівкового охолодження виступає ефективність охолодження та параметр вдуву. Існує широкий ряд

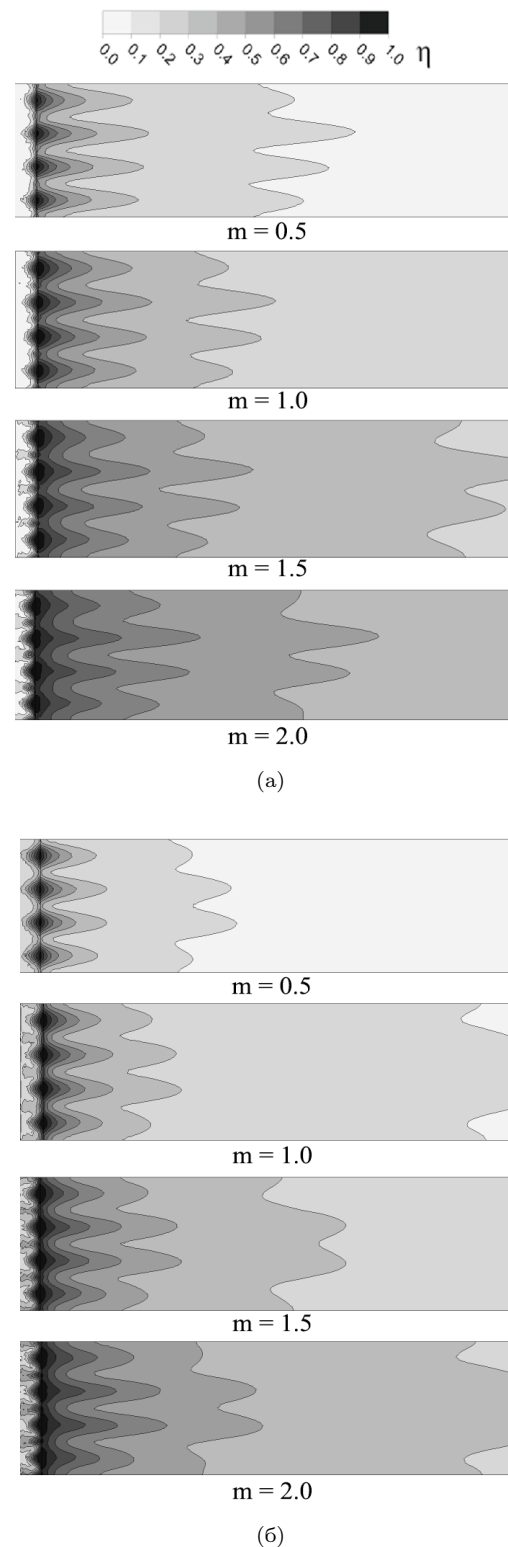


Рис. 3. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$: а – за низьких (модельних) температур; б – за високих температур

робіт з дослідженими різними параметрами, які були опрацьовані та узагальнені штатом Інституту те-

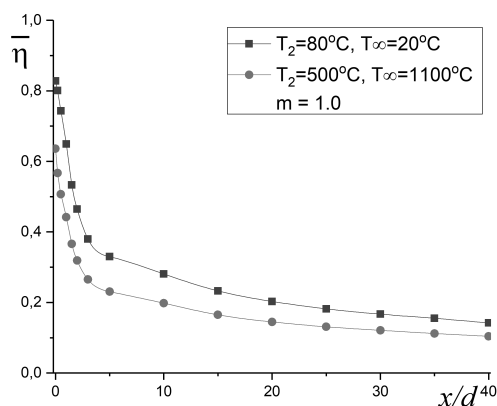


Рис. 4. Усереднена по ширині ефективність плівкового охолодження для параметру вдуву $m = 1.0$

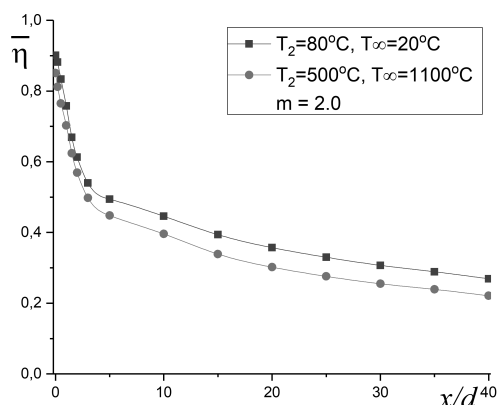


Рис. 5. Усереднена по ширині ефективність плівкового охолодження для параметру вдуву $m = 2.0$

хнічної теплофізики НАН України, з якими можна ознайомитись [3]. Проте темою цієї роботи є фактор неізотермічності.

На рис. 3а та рис. 3б можна спостерігати поля ефективності (ізолінії) для розрахунків з різними температурами при вдуві охолоджувача через отвори в траншеї за різних параметрах вдуву $m = 0.5; 1.0; 1.5; 2.0$. Видно, ефективність за низьких (модельних) температур вища.

На рис. 4 та рис. 5 наведено осереднені по ширині значення ефективності плівкового охолодження для параметрів $m = 1.0$ та $m = 2.0$. Видно, що ефективність плівкового охолодження схеми за високих температур менша, ніж при низьких (модельних). Максимальна ефективність спостерігається за максимального ($m = 2.0$) параметра вдуву.

Для аналізу фізичної структури потоку за отворами вдуву також розглянемо локальну ефективність плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень x/d для схеми з вдувом охолоджувача за низьких (модельних) температур рис. 6а і за високих температур рис. 6б.

На графіках локальної ефективності плівкового охолодження практично не спостерігається різниця між розрахунками для високих та низьких температур. Піки ефективності не мають великих перепадів, що свідчить про те, що охолоджувач рівномірно

покриває поверхню, що захищається. При високих температурах ефективність охолодження нижча.

Також це свідчить про те, що збільшення температури та її різниці у певних діапазонах практично не впливає на фізичну структуру потоків та не зумовлює появу вихорних явищ.

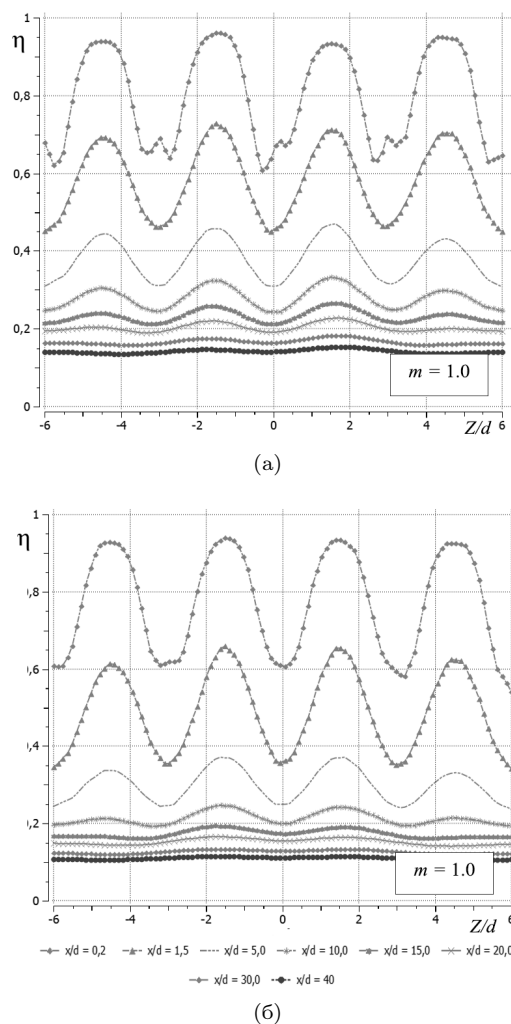


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження при $m = 1$: а – за низьких (модельних) температур; б – за високих температур

На рис. 7 показана залежність ефективності при збільшеній температурі до ефективності за модельних умов від відносного кроку x/d при різних параметрах вдуву. Отримано, що ефективність сильно зменшується на початковій ділянці $x/d = 0 \dots 4$ і надалі темп зменшення поступово зменшується. Така ситуація відбувається за будь-якого параметру вдуву. Проте зі збільшенням параметру вдуву до $m = 2.0$ вплив різниці температур вже не такий значний (падіння ефективності до 14.2%, в інших випадках до 35%).

На рис. 8 наведено залежність відношення середньої по поверхні ефективності плівкового охолодження від параметру вдуву. Як видно з рисунка результуюча ефективність плівкового охолодження за високих температур менша, ніж ефективність за модельних параметрів при усіх параметрах вдуву:

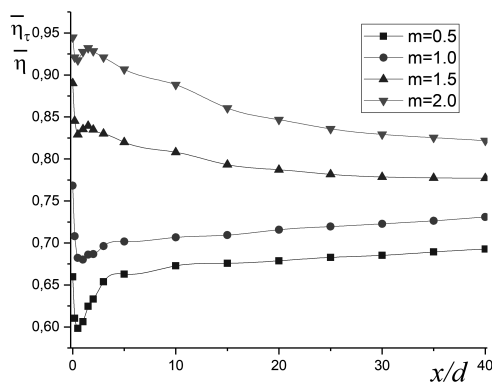


Рис. 7. Залежність відношення ефективності плівкового охолодження за високих температур до ефективності при модельних температурах при різних параметрів вдуву

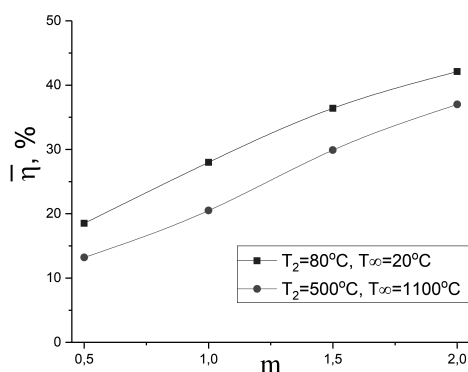


Рис. 8. Залежність відношення ефективності плівкового охолодження за високих температур до ефективності при модельних температурах при різних параметрів вдуву

на 34.8% за $m = 0.5$, на 25.7% за $m = 1.0$, на 18.1% за $m = 1.5$, на 14.2% за $m = 2.0$.

Введемо параметр, який буде характеризувати відношення ефективності плівкового охолодження за збільшеної температури до ефективності за модельних умов з відповідною температурою:

$$\varepsilon_\tau = \frac{\bar{\eta}_\tau}{\bar{\eta}_0} \quad (2)$$

З рівняння 2 отримуємо, що

$$\varepsilon_\tau = 0,147m + 0,588 \quad (3)$$

На рис. 9 наведено залежність коефіцієнту ε_τ від різних параметрів вдуву.

При впливі фактору неізотермічності спостерігається зменшення ефективності при усіх значеннях параметру вдуву, особливо при $m = 0,5$ (ефективність зменшується до 35%), а менше всього для параметру вдуву $m = 2,0$ (до 14%).

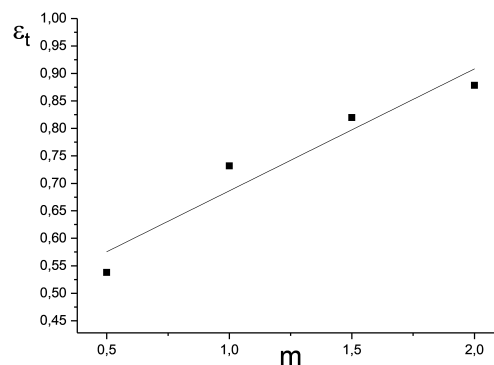


Рис. 9. Залежність коефіцієнту ε_τ від параметру вдуву

Висновки

Було виконано теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження та фізичної структури потоку для схеми плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї для різних параметрів температури та параметрів вдуву. Досліджена схема є одною з еталонних з точки зору теплофізичних задач та становить практичний інтерес для побудови газотурбінних установок.

Для дослідження фактору неізотермічності була досліджена схема з видувом охолоджувача через отвори в поперечній траншеї за модельних умов та за високих температур. Розрахунки показали, що підвищення температури і різниці температур негативно впливає на ріст ефективності плівкового охолодження. У середньому ефективність плівкового охолодження за високих температур на 20,4% менша ніж за модельних умов (25.12% для високих температур проти 31.59% для модельних). Була розрахована поправка для фактору неізотермічності.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : монография / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Б. Резник. – Киев : НТУУ «КПИ», Изд-во «Политехника», 2016. – Т.10 : Перспективные схемы пленочного охлаждения. – 238 с.
2. Волчков, Э. П. Пристенные газовые завесы : монография / Волчков, Э. П. – Новосибирск : Наука. 1983. – 241 с.
3. Халатов, А. А., Дашевский, Ю. Я. Пленочное охлаждение с выдувом охладителя в поверхностные углубления : монография / А. А. Халатов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский – Киев : НТУУ «КПИ», Изд-во «Политехника», 2013.