УДК 536.242

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗА ОТВОРАМИ В ПОПЕРЕЧНІЙ ТРАНШЕЇ: РІЗНІ ОРІЄНТАЦІЇ ВПУСКУ ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПОТОКУ

С. В. Потапов[1,a], А. А. Халатов[1,2]

[1] Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

[2] Інститут 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 програмного пакету ANSYS CFX 2020 r2. Наведені розрахунки для параметру вдуву в діапазоні від $0,5$ до $2,0$ для різних конфігурацій вдуву охолоджуючого потоку відносно основного потоку: спільний напрям, протилежний напрям і перпендикулярний напрям.

Ключові слова: плівкове охолодження, траншея, конфігурації вдуву охолоджуючого потоку

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:

$$\eta = \frac{T_{aw} - -T_{\infty}^{*}}{T_{2}^{*} - -T_{\infty}^{*}} \qquad (1)$$

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 для різних конфігурацій вдуву охолоджуючого потоку відносно основного потоку: спільний напрям, протилежний напрям і перпендикулярний напрям.

1. Комп'ютерне моделювання

Числове моделювання плівкового охолодження було виконано з використанням програмного пакету *ANSYS CFX 2020 R2*. Дослідження було проведено для моделей, які мають подібну геометрію та однакові фізичні параметру потоку.

1.1. Опис геометрії моделі

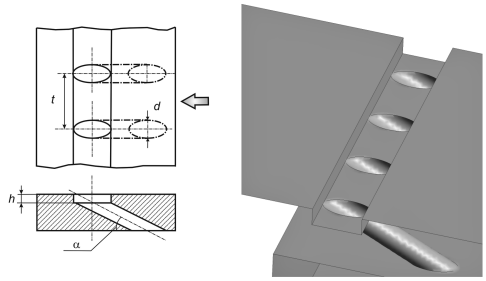
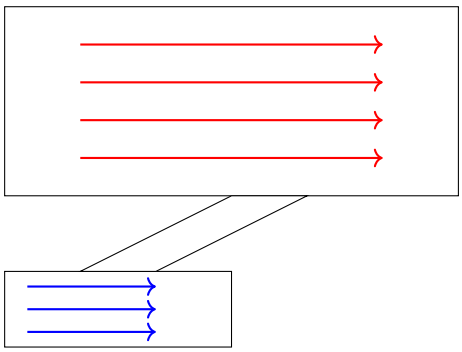


Рис. 1. Досліджений спосіб плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї

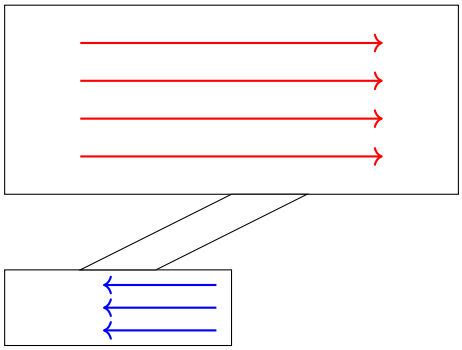
Геометрична модель представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму через отвори вдуву. Схема конфігурації приведена на рис. 1.

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

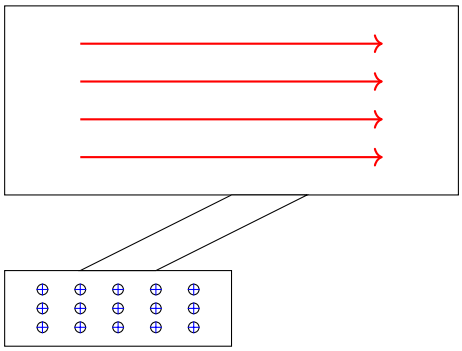
[a]sampotapoff@gmail.com



(а) основний і вторинний потоки мають спільний напрям при впуску



(б) основний і вторинний потоки мають протилежний напрям при впуску



(в) вторинний потік є перпендикулярним до основного

Рис. 2. Схематичне зображення розглянутих випадків взаємоорієнтації основного і вторинного потоків

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 $\alpha = 30°$.

Досліджувана геометрична 3D–модель плівкового охолодження плоскої поверхні була розроблена за допомогою інструмента *SpaceClaim* пакету *ANSYS* та представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (плenуму) через отвори вдуву, зображених на рис. 4.

Для дослідження впливу фактору різних орієнтацій впуску охолоджувача було розглянуто три випадки:

1. основний і вторинний потоки мають спільний напрям при впуску на рис. 2(а) [2]
2. основний і вторинний потоки мають протилежний напрям при впуску на рис. 2(б)
3. вторинний потік є перпендикулярним до основного на рис. 2(в)

1.2. Налаштування моделі та основні фізичні параметри

Швидкість основного потоку становить 37 м/с. Співвідношення густин вторинного потоку до основного потоку DR становить 0.83. Значення інтенсивності турбулентності прийняте за 1%. Граничні умови відповідають значенням параметра вдуву близьким до $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$.

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

Температура основного потоку – $20°C$, температура вторинного потоку – $80°C$.

1.3. Модель турбулентності та розрахункова сітка

Дослідження виконувалися з використанням *осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS)* у стаціонарному вигляді (*SteadyState*). Модель турбулентності і конфігурація розрахункової сітки обиралась ітеративно (рис. 3).

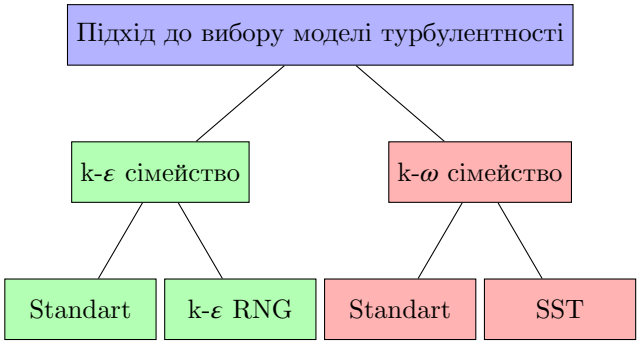


Рис. 3. Діаграма процедури вибору моделі турбулентності.

В результаті проведення розрахунків і верифікації отриманих даних шляхом порівняння з експериментальними даними, була обрана *SST-модель* турбулентності для замкнення системи рівнянь RANS. Ця модель турбулентності в сукупності з детальною

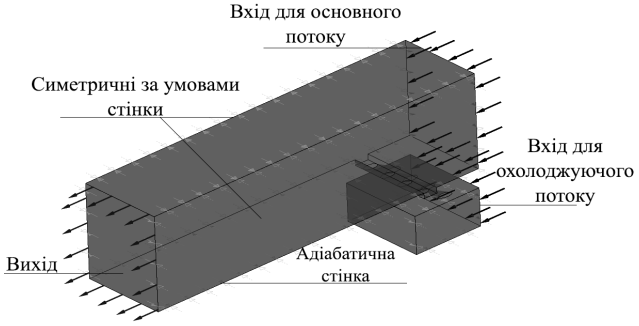


Рис. 4. Геометрія 3D-моделі та параметри її сторін

розрахунковою сіткою показує реалістичні результати і добре співвідноситься з експериментальними даними [3]. З цього ж виходить і головний недолік – потребується вельми потужна конфігурація обчислювальної машини і значна кількість часу.

Для побудови розрахункової сітки використаний генератор *ANSYS Mesh*. Схема побудови фінальної розрахункової сітки наступна: сітка структурована з диференційованою густиною елементів: найбільша густина елементів у зонах інтересу (основний потік), найменша – вдалині від нього. В областях контакту твердих стінок і основного потоку побудовані згущення (кількість шарів – 20), що складаються з призматичних елементів. Розрахункова сітка складається з 2.5 млн елементів та 800 тисяч вузлів.

2. Результати та аналіз моделювання

2.1. Обговорення результатів

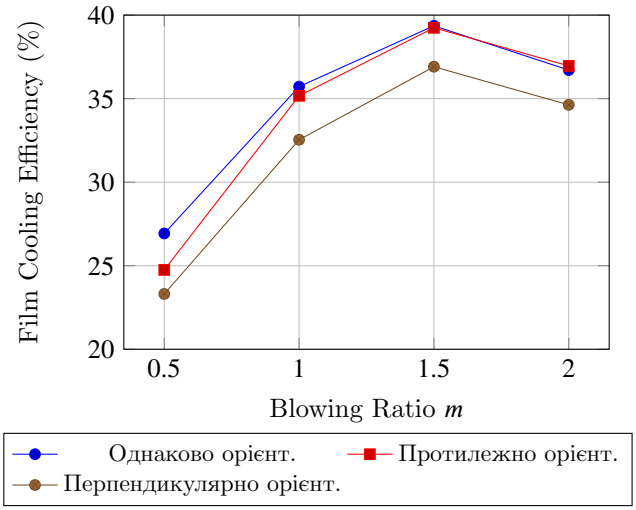


Рис. 5. Ефективність плівкового охолодження, осереднена по усій площі охолоджуваної поверхні

Розглянемо результати обчислень у формі осередненої по усій охолоджуваній поверхні ефективності плівкового охолодження η_0 на рис. 5.

- *Однаковий напрямок вдуву*. При збільшенні параметру вдуву m в діапазоні від $0,5$ до $1,5$, ефективність охолодження плівки також збільшується з $26,93\%$ до $39,36\%$, і поступово зменшується за параметру вдуву $m = 2$ до значення $\eta_0 = 36,71\%$
- *Протилежний напрямок вдуву*. При збільшенні параметру вдуву m в діапазоні від $0,5$ до $1,5$, ефективність охолодження плівки також збільшується з $24,75\%$ до $39,24\%$, і поступово зменшується за параметру вдуву $m = 2$ до значення $\eta_0 = 36,96\%$
- *Перпендикулярний напрямок вдуву*. При збільшенні параметру вдуву m в діапазоні від $0,5$ до $1,5$, ефективність охолодження плівки також збільшується з $23,31\%$ до $36,91\%$, і поступово зменшується за параметру вдуву $m = 2$ до значення $\eta_0 = 34,63\%$

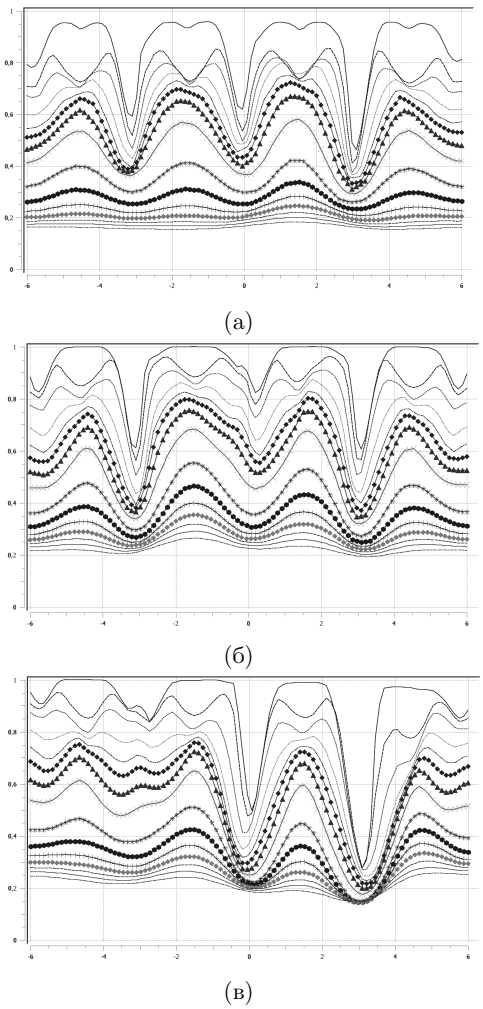


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження за $m = 1$: а – однаковий напрямок вдуву; б – протилежний напрямок вдуву; в – перпендикулярний напрямок вдуву

Розглянемо рис. 6 на якому зображена поперечна локальна ефективність плівкового охолодження за $m = 1$.

- *Однаковий напрямок вдуву* (рис. 6(а)). Піки ефективності не мають великих перепадів, охолоджувач рівномірно покриває охолоджувану поверхню.
- *Протилежний напрямок вдуву* (рис. 6(б)). Спостерігається нерівномірність покриття в діапазоні $z/d = -3 \dots 3$. Це зумовлено закрученням потоку при його всмоктуванні у з'єднуючий циліндр.
- *Перпендикулярний напрямок вдуву* (рис. 6(в)). Спостерігається значна нерівномірність охолодження по поверхні в діапазоні $z/d = -1 \dots 6$, що пояснюється наступним чином:
  1. нерівна кількість речовини охолоджувача попадає у кожен з'єднуючий циліндр. Це провокує більшу швидкість потоку у циліндрах, які знаходяться найближче до місця вдуву охолоджувача, що спричиняє інтенсифікацію вихорових структур та відрив

потоку охолоджувача від поверхні, що захищається.

2. також спостерігається значне закручення потоків при всмоктуванні у з'єднуючі циліндри. Чим далі циліндр від місця вдуву охолоджувача, тим менш виражене закручення потоку.

2.2. Обчислення поправок для врахування ефекту різноорієнтованих потоків

Введемо поправку ε_{dir}, яка характеризує відношення ефективності плівкового охолодження у випадку різноорієнтованих потоків η_{dir} до ефективності плівкового охолодження у випадку одноорієнтованих потоків η_0:

$$\varepsilon_{dir} = \frac{\bar{\eta_{dir}}}{\bar{\eta_0}} \qquad (2)$$

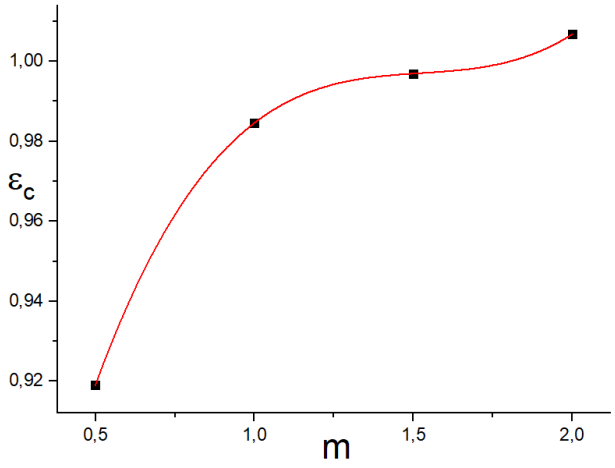


Рис. 7. Залежність коефіцієнту ϵ_c від параметру вдуву m

З рівняння (2) отримуємо поправку для протилежного напрямку вдуву охолоджувача:

$$\varepsilon_c = 0,7495 + 0,4766m - 0,3092m^2 + 0,0676m^3 \qquad (3)$$

На рис. 7 наведено залежність коефіцієнту ϵ_c від різних параметрів вдуву.

З рівняння (2) отримуємо поправку для перпендикулярного напрямку вдуву охолоджувача:

$$\varepsilon_p = 0,8041 + 0,1371m - 0,0269m^2 - 0,0034^3 \qquad (4)$$

На рис. 8 наведено залежність коефіцієнту ϵ_p від різних параметрів 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 конфігурацій вдуву охолоджуючого потоку відносно основного потоку: спільний напрям, протилежний напрям і перпендикулярний напрям.

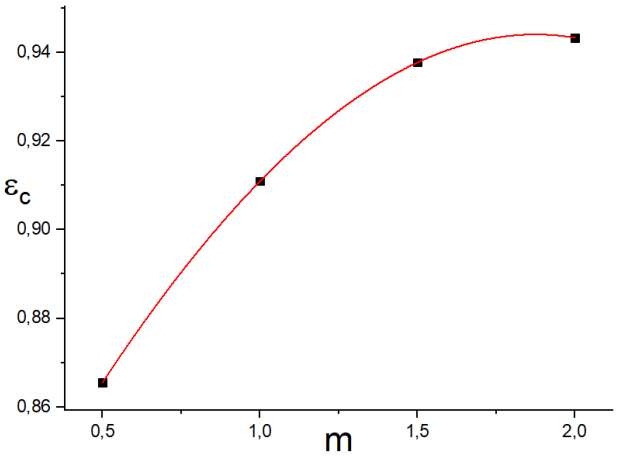


Рис. 8. Залежність коефіцієнту ϵ_c від параметру вдуву m

Розрахунки показали, що протилежний напрямок вдуву охолоджувача відносно основного потоку не має значного впливу на ефективність плівкового охолодження та структуру потоку. Перпендикулярний напрям вдуву охолоджувача має значний вплив на ефективність плівкового охолодження (зменшується на $2-3\%$), інтенсифікує вихорові структури та спричиняє значну нерівномірність охолодження по поверхні, що захищається. Були розраховані поправки для різних конфігурацій вдуву.

Варто зазначити, що задачу з перпендикулярною орієнтацією вдуву варто розв'язувати як нестаціонарну, оскільки розв'язок стаціонарної задачі не дає повного уявлення про розвиток процесів всередині потоку.

Перелік використаних джерел

1. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / А. Халатов, И. Борисов, Ю. Дашевский, С. Резник // Перспективные схемы пленочного охлаждения. — 2016. — Т. 10. — С. 238.
2. *Потапов С.*, *Панченко Н.* Ефективність плівкового охолодження за отворами в поперечній траншеї: фактор неізотермічності // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. — 2020. — Т. 1. — С. 95—99.
3. *Халатов А.*, *Северін С.* Плівкове охолодження з видувом охолоджувача в поверхневі заглилблення // Звіт ІТТФ НАН України. — 2020. — С. 30.