

ГАЗОВА ЗАВІСА УВІГНУТОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПОДАЧІ ВТОРИННОГО ПОТОКУ В ПОПЕРЕЧНУ ТРАНШЕЮ

С. В. Потапов^{1,2, a}, 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 та увігнутої пластин з подачею вторинного потоку через дискретні отвори в траншеї. Моделювання проводилися за допомогою комерційного програмного забезпечення ANSYS CFX 20.2. та з відповідними розрахунками для діапазону переметру вдуву від 0,5 до 2,0.

Ключові слова: плівкове охолодження, траншея, криволінійність, увігнута поверхня, комп'ютерне моделювання

Вступ

Газотурбінні установки широко набули широкого застосування в сферах енергетики, авіації, суднобудування. Оскільки ККД ГТУ прямим чином залежить від значень робочих температур, потрібно ці самі температури підвищувати. Проте за високих температур існують проблеми використування традиційних матеріалів, які не здатні витримати подібне температурне навантаження, а вартість актуальних високотехнологічних теплозахисних покриттів та температурорезистентних матеріалів залишається високою. Тому для цілісності устаткування, зокрема лопаток турбіни, використовуються методи активного охолодження. Плівкове охолодження є одним із основних способів охолодження лопаток, яке інтегрується в її конструкцію.

Існує велика кількість досліджених геометричних конфігурацій плівкового охолодження. Зазвичай, для визначення необхідних параметрів потоків та середовища використовуються CFD-пакеми, які забезпечують високу достовірність отриманих даних за умови правильно налагоджених систем та своєчасних верифікацій з наявними теоретичними та експериментальними даними.

В даному дослідженні була обрана конфігурація поперечної траншеї з дискретними отворами. Порівняні дві варіації поверхонь каналу: плоского та випуклого.

В даній доповіді наявні результати розрахунків для двох конфігурацій зі змінним параметром вдуву, значення якого знаходяться в діапазоні від 0.5 до 2 з кроком 0.5. Розрахунки виконані в пакеті ANSYS CFX.

При дослідженні різних форм отворів великою популярністю користується комп'ютерне моделювання,

через великі затрати при створенні експериментальної установки та відносно невеликі розбіжності при створенні моделі. 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} – адиабатична температура поверхні, що захищається, T_2^* – повна температура охолоджувача на виході з отворів [1].

Метою роботи є дослідження ефективності та фізичної структури плівкового охолодження при подачі охолоджувача в поперечну траншею з дискретними отворами за прямої та випуклої охолоджуваних поверхонь.

1. Комп'ютерне моделювання

Числове моделювання плівкового охолодження було виконано з використанням програмного комплексу ANSYS CFX 20.2.

Геометрична модель, що досліджується, представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму через отвори вдуву. Конфігурація геометрії траншеї та геометрія 3D-моделі зображені на (рис. 1а) та (рис. 1б) відповідно.

Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерним для реальних систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. Діаметр отвору d складає 0,8 мм, поперечний крок заглиблень $= 2,4$ мм ($t/d = 43,0$), висота траншеї $h = 0,6$ мм ($h/d = 0,75$), кут нахилу отворів до поверхні $\alpha = 30^\circ$, радіус кривизни поверхні $R = 50$ мм. Результати для варіанту з прямолінійною поверхнею базуються на роботі [2].

^asampotapoff@gmail.com

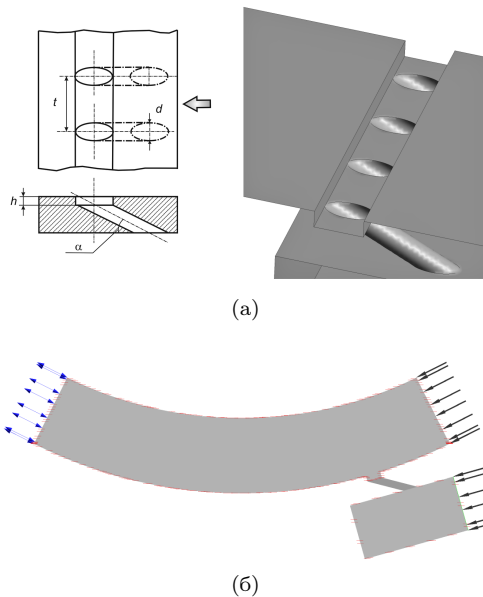


Рис. 1. а – конфігурація геометрії; б – геометрія 3D-моделі

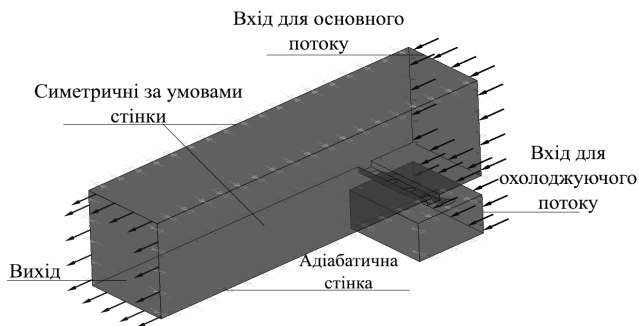


Рис. 2. Геометрія 3D-моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдюві охолоджувача через отвори у траншейному заглибленні

Досліджувана геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні була виконана в модулі Geometry пакету SpaceClaim 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 розрахункової області.

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 620 тисяч вузлів та 1,9 млн. елементів.

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідали значенням параметра вдуву

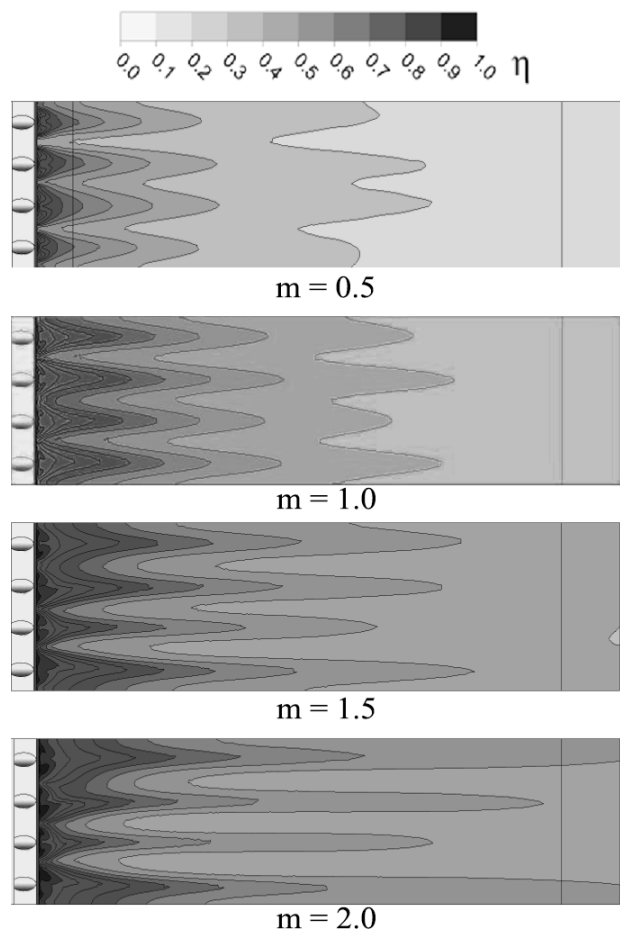


Рис. 3. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$

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.

- 1) температура основного потоку – 20°C , швидкість основного потоку становить 37 м/с
- 2) температура вторинного потоку – 80°C , швидкість потоку відповідає витратам згідно параметра вдуву.

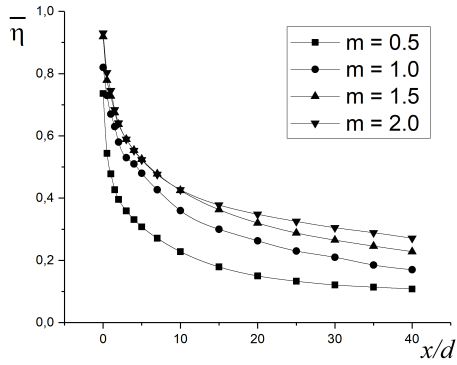
Інтенсивність турбулентності прийнята за 1%. Напрямок теплового потоку - обернений, що припустимо за невисокої ступені неізотермічності. [3]

Дослідження виконувалися з використанням осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) і для замкнення системи рівнянь використовується SST-модель турбулентності, яка зарекомендувала себе в цілому ряді подібних, та являється вдалою комбінацією $k-\epsilon$ та $k-\omega$ моделей турбулентності, що дає реалістичні розрахунки в пристіночних областях та в розрахункових областях вдалині від стінок.

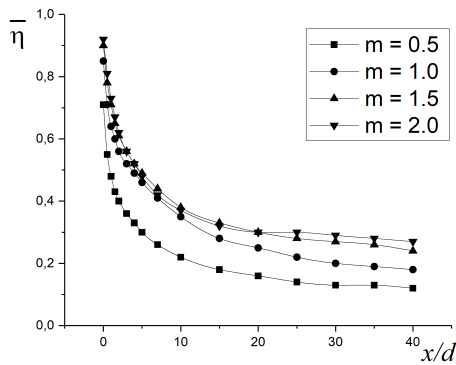
2. Результати та аналіз моделювання

Для аналізу дослідження використовуємо параметр ефективності плівкового охолодження, що наведений в формулі (1).

На рис. 3 зображені ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження для випадку вигнутої



(а) Прямолинійна поверхня



(б) Вигнута поверхня

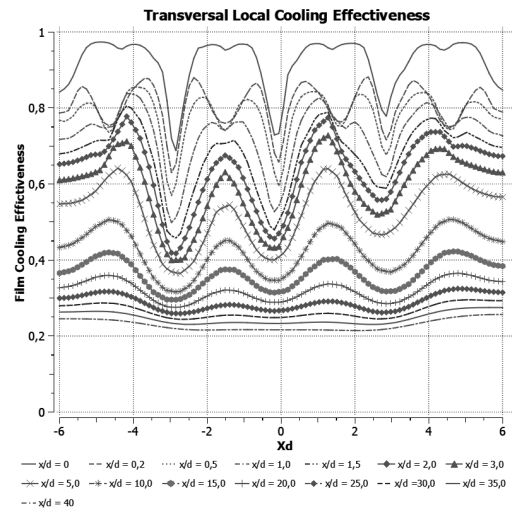
Рис. 4. Ефективність плавкового охолодження при різних параметрах вдуву для однорядної конфігурації отворів.

поверхні. З ростом параметру вдуву відповідно зростає і ефективність охолодження. З ростом параметру вдуву видно, що зростає повздовжня асиметрія температурних полів.

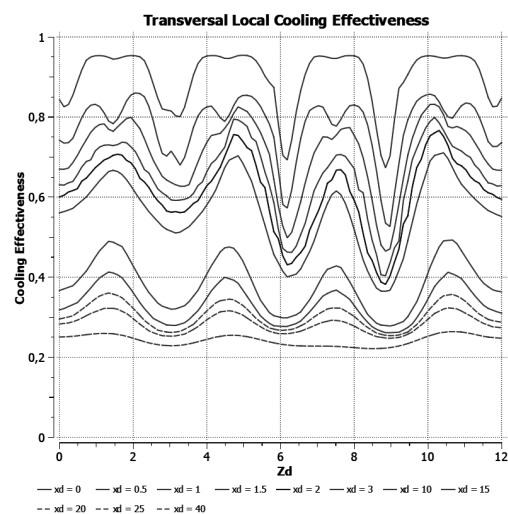
На рисунку 4а та 4б представлені локальні ефективності вздовж робочої ділянки, що поперечно осереднені. На усьому діапазоні параметру вдуву у випадку увігнутої поверхні ефективність плівкового охолодження зменшується на 1 – 3%.

Для аналізу фізичної структури потоку за отвором вдуву також розглянемо локальну ефективність плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень x/d для схеми з вдувом охолоджувача в отвори в траншеї на прямій поверхні (рис. 5а) і на вигнутій поверхні (рис. 5б). Звідси чітко прослідковується тенденція, що з ростом параметру вдуву поля ефективності деформуються та стають асиметричними вздовж ліній току охолоджувача з отворів. Загальна ж поведінка не має глобальних змін. Охолоджувач доволі рівномірно вкриває охолоджувану поверхню, що сприяє підвищенню осередненої поперечної ефективності.

З рис. 6 видно, що усереднена ефективність плівкового охолодження зменшується при вигнутій поверхні на усьому діапазоні значень параметру вдуву.



(а) Прямолинійна поверхня



(б) Вигнута поверхня

Рис. 5. Локальна ефективність плівкового охолодження при $m = 1.5$.

Пояснити зменшення ефективності можна пояснити наступним чином: товщина в'язкого і теплопровідного примежового шару на увігнутій поверхні зменшуються, а швидкість і температура - збільшуються на границі примежового шару, що співвідноситься з результатами роботи [4]. Коло увігнутої поверхні відцентрові масові сили мають активний характер, що загальним чином сприяє розвитку турбулентності, причому профілі швидкості та температури будуть більш заповнені, ніж у випадку обтікання плоскої поверхні. До того ж, в ряді джерел [5] зазначено, що у випадку обтікання увігнутих поверхонь можуть з'явитися вихори Гьортлера, які деформують течію охолоджувача та можуть пошкодити цілісність охолоджуючої плівки.

Висновки

Було виконано теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження та фізичної структури потоку для схеми плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї для випадків плоскої та вигнутої поверхонь. Досліджена схема є

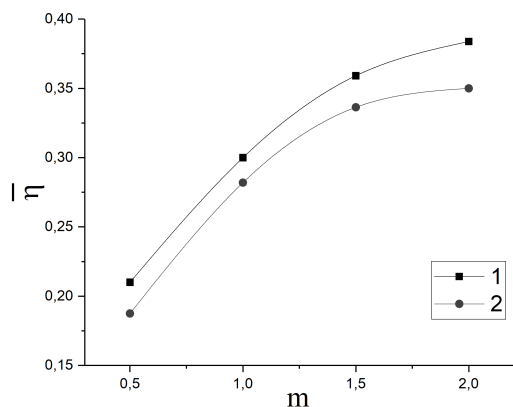


Рис. 6. Порівняння усередненої ефективності по усій площі охолоджуваної поверхні, де 1 – ефективність охолодження за прямолінійної поверхні, 2 – ефективність охолодження за вигнутою поверхнею

одною з еталонних з точки зору теплофізичних задач та становить практичний інтерес для побудови газотурбінних установок.

Розрахунки показали, що криволінійність поверхні (в даному випадку увігнута) негативно впливає на загальну ефективність плівкового охолодження на 1 – 3%, що пояснюється наявністю відцентрових масових сил активного характеру та можливістю появи додаткових злякисних вихорів.

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. Потапов С. В. Газова завіса з подачею вторинного потоку в поперечну траншею: дипломна робота. – Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 61 с.
3. Волчков, Э. П. Пристенные газовые завесы : монография / Волчков, Э. П. – Новосибирск : Наука. 1983. - 241 с.
4. Халатов А. А. Газовая завеса на выпуклой поверхности с внешней турбулентностью и отрицательным градиентом давления / Халатов А.А., Авраменко А. А., Борисов И. И. //Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29. – №. 1. – С. 101-107.
5. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях массовых сил //Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – №. 4. – С. 743-756.