

ГАЗОВА ЗАВІСА З ПОДАЧЕЮ ВТОРИННОГО ПОТОКУ В ПОВЕРХНЕВІ ЗАГЛИБЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

А. О. Іванова¹, Н. А. Панченко^{1, 2}

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Наведено результати комп'ютерного моделювання плівкового охолодження плоскої пластини з подачею вторинного потоку через один ряд похилих отворів в поверхневих заглибленнях циліндричної форми. В якості базової використана традиційна конфігурація похилих отворів (без заглиблень) з аналогічними відносними геометричними розмірами. Для чисельного моделювання було використано комерційне програмне забезпечення Ansys CFX 14. Наведені результати розрахунку плівкового охолодження при різних параметрах вдуву. Показано, що ефективність плівкового охолодження дослідженої схеми з циліндричними заглибленнями перевищує ефективність традиційної схеми.

Ключові слова: плівкове охолодження, поверхневі заглиблення, параметр вдуву, ефективність плівкового охолодження, комп'ютерне моделювання, SST модель турбулентності

Вступ

Газотурбінні установки (ГТУ) широко використовуються в енергетиці, цивільній та військовій авіації, суднобудуванні, промисловості, транспортуванні природного газу тощо. Із зростанням температури підвищується ККД ГТУ, тому актуальним питанням є забезпечення надійності роботи лопаток турбіни при досягненні високої температури газу перед турбіною (близько 1500°C). Однак, можливість підвищення температури обмежується робочими температурами матеріалів лопаток. В даний час турбінні лопатки, виконані з кращих матеріалів, можуть працювати без охолодження при температурі газу не вище $1000 - 1100^{\circ}\text{C}$. Тому перспективним напрямком є дослідження та розробка різних способів внутрішнього і зовнішнього охолодження лопаток турбіни.

Існують різні способи охолодження, серед них найбільш ефективний — плівкове охолодження, коли охолоджуюче повітря подається безпосередньо на зовнішню профільну поверхню лопаток або торцеву поверхню міжлопаточного каналу через систему отворів, щоб теплоізолювати поверхню від впливу потоку гарячого газу [1]. Також плівкове охолодження ще називають газовою завісою.

Для лопаток газових турбін важливо забезпечити тривалий термін служби тому неможливо застосовувати схеми, що знижують характеристики міцності (суцільна щілина), схеми разового використання (аблюючий пояс) та схеми мікроскопічних отворів (пористий пояс), які швидко засмічуються твердими частинками продуктів згоряння. Виходячи з цих вимог, при охолодженні лопаток турбін традиційно застосовуються схеми з циліндричними похилими отворами в стінці лопатки, розташованими під кутом

$\alpha = 30\text{--}45^{\circ}$ до поверхні. Вони також характеризуються рядом недоліків, основний з яких - виникнення вторинних вихрових структур, які призводять до зниження ефективності плівкового охолодження. У зв'язку з цим активно вивчаються нові перспективні конфігурації, основними вимогами до яких є рівномірність покриття поверхні плівкою охолоджувача, висока теплофізична ефективність, а також технологічність виробництва [2, 3].

Метою даної роботи є дослідження ефективності плівкового охолодження і фізичної структури при подачі вторинного потоку в похилі отвори в циліндричних заглибленнях (рис. 1). В якості базової конфігурації використана традиційна схема похилих отворів (без заглиблень).

1. Комп'ютерне моделювання

Для розрахунків використано комерційне програмне забезпечення AnsysCFX. На рис. 1 представлено досліджені однорядні схеми – традиційних похилих отворів та отворів з вдувом у циліндричні заглиблення. 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 $t = 2,4$ мм ($t/d = 3,0$), висота заглиблення $h = 0,4$ мм ($h/d = 0,5$), кут нахилу отворів до поверхні $\alpha = 30^{\circ}$.

Досліджувана геометрична 3D – модель плівкового охолодження плоскої поверхні була виконана в ANSYS DesignManager. Геометрична модель представляє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (пленуму) через отвори вдуву (рис. 2). Була використана

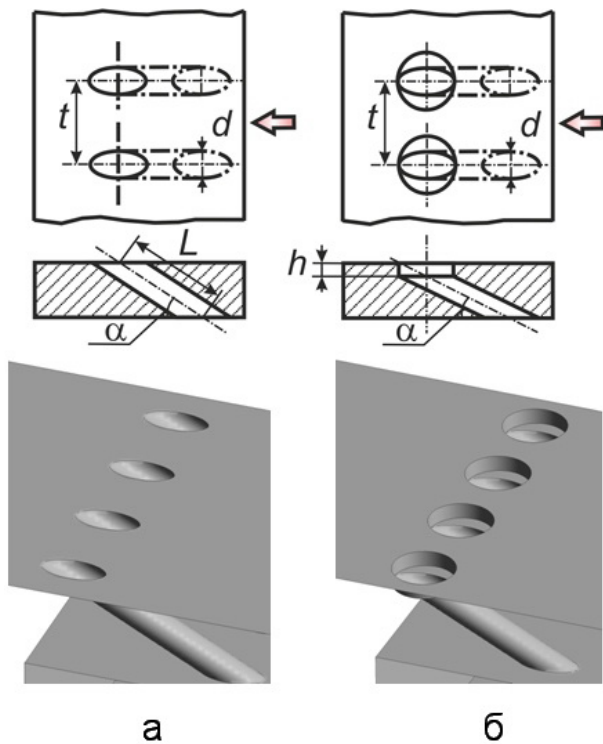


Рис. 1. Досліджені способи плівкового охолодження: а – традиційний ряд похилих отворів; б – отвори в циліндричних заглибленнях

неструктурована комбінована розрахункова сітка, яка була побудована у генераторі *ANSYS Mesh*. Вона є комбінацією тетраедричних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущення сітки поблизу твердих стінок, які є обмеженням для каналів розрахункової моделі. Розмірність розрахункової сітки вибиралася з міркувань забезпечення прийнятної часу розрахунку без істотного збитку для точності одержуваних результатів. Оптимальне число вузлів розрахункової сітки в загальному випадку залежить від розмірів моделі і числа отворів плівкового охолодження і для дослідженої в даній роботі моделі складає 745 тисяч вузлів та 3,5 млн. елементів.

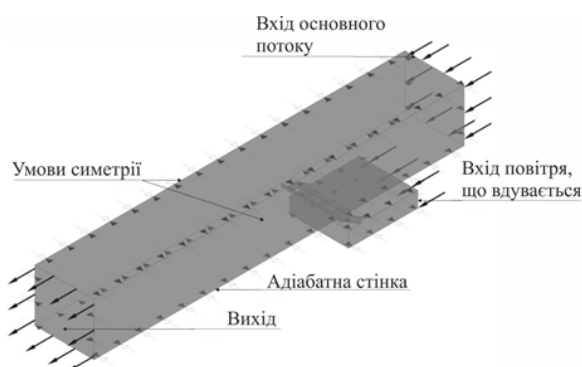


Рис. 2. Геометрична 3D – модель плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через отвори у циліндричних заглибленнях

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідали значенням параметра вдуву близьким до $m=0,5; 1,0; 1,5; 2,0$. Швидкість основного потоку становила 37м/с, температура - 20°, температура вторинного потоку - 80°. Інтенсивність турбулентності прийнята 1 %. Тверді границі розрахункової області були задані як для адіабатної стінки ($q = 0$). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії.

Дослідження виконувалися з використанням *RANS SST* – моделі турбулентності, яка добре зарекомендувала себе при моделюванні плівкового охолодження, що було показано в раніше опублікованих роботах авторів [4].

2. Результати та їх аналіз

Основними характеристиками плівкового охолодження є ефективність плівкового охолодження і параметр вдуву, що визначає гідродинамічні характеристики. На рис. 3 наведено осереднені по ширині значення ефективності плівкового охолодження досліджувальних схем. Видно, що ефективність плівкового охолодження схеми з вдувом потоку через отвори в циліндричних заглибленнях перевищує ефективність традиційної схеми (без заглиблень). Збільшення ефективності плівкового охолодження за малих значень параметра вдуву спостерігається на початковій та стабілізаційній ділянці ($x/d = 0 \dots 20$). Максимальна ефективність спостерігається за мінімального параметра вдуву.

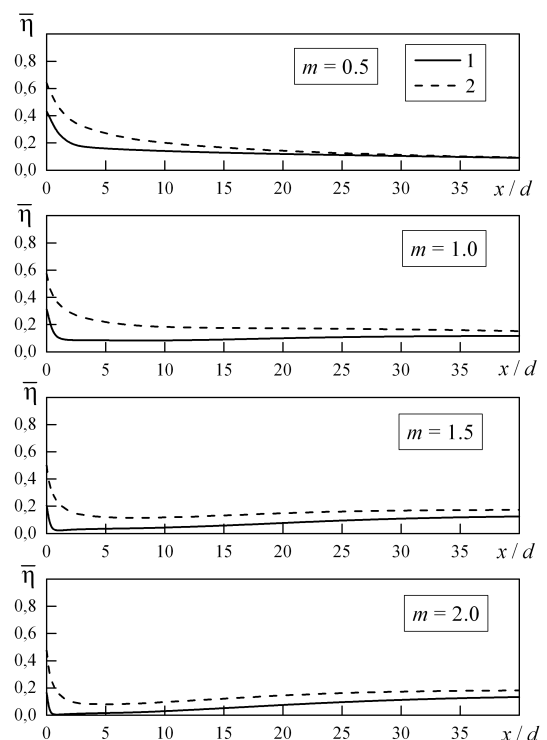


Рис. 3. Ефективність плівкового охолодження при різних параметрах вдуву для однорядної конфігурації отворів: 1 – традиційний ряд похилих отворів; 2 – отвори в циліндричних заглибленнях

На рис. 4 приведені поля ефективності плівкового охолодження досліджувальних схем з вдувом охолоджувача в циліндричні заглиблення (рис. 4,а) і в ряд традиційних отворів (рис. 4,б) при параметрах вдуву $m=0,5; 1,0; 1,5; 2,0$.

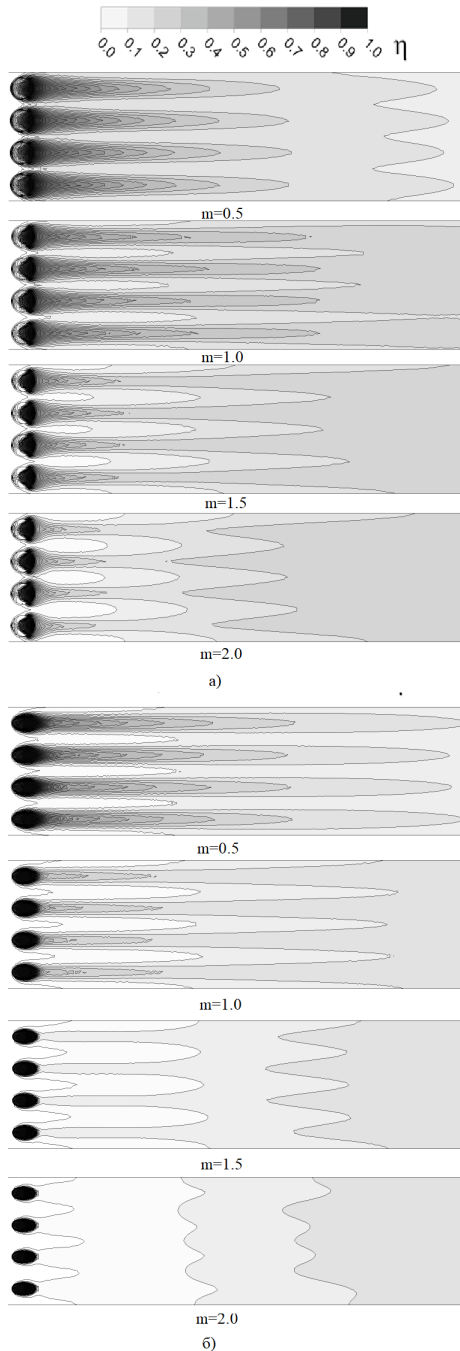


Рис. 4. Ізолнії локальної ефективності плівкового охолодження на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$: а – за традиційними отворами; б – за отворами у циліндричних заглибленнях

При всіх досліджуваних значеннях параметра вдуву схема плівкового охолодження з подачею вторинного повітря через отвори в циліндричних заглибленнях забезпечує більшу рівномірність полів ефективності плівкового охолодження на поверхні охолоджуваної пластини в порівнянні з традицій-

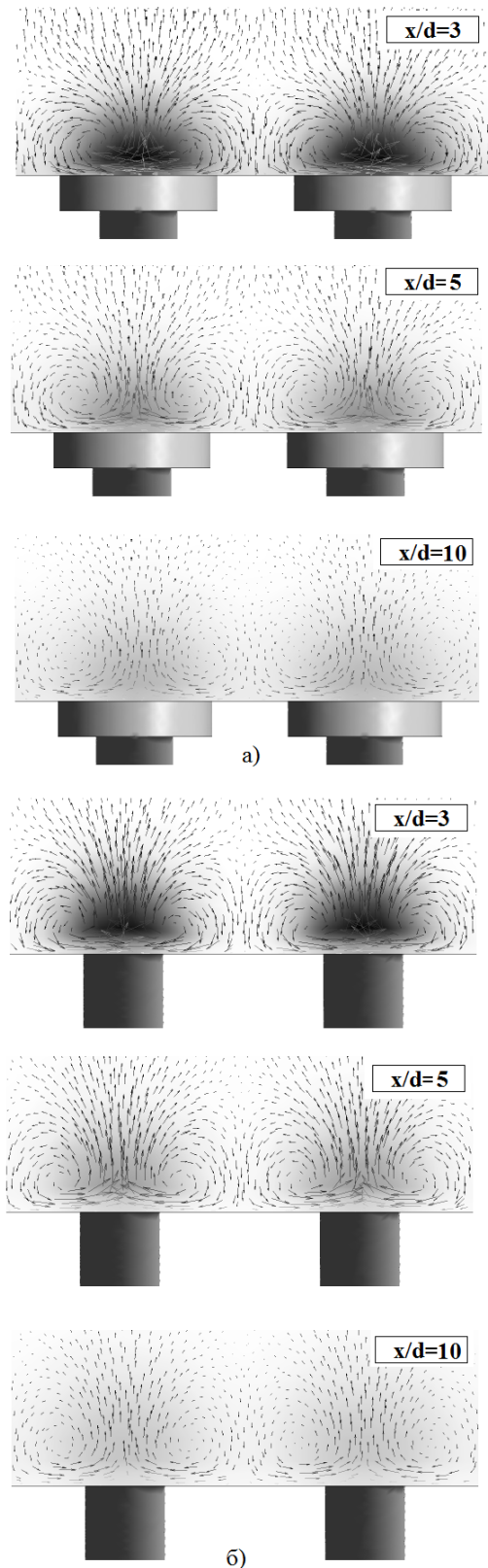


Рис. 5. Вихрова структура у поперечних перерізах при $m=1,0$ на відстані $x/d=3; 5; 10$: а – отвори в циліндричних заглибленнях; б – традиційний ряд похилих отворів

ною схемою отворів, особливо за великих значень параметра вдуву, коли ефективність охолодження традиційної схеми суттєво знижується.

Для аналізу фізичної структури потоку розглянемо проекції векторів швидкості в поперечних перерізах на відстані $x/d = 3; 5$; та 10 при $m = 1, 0$ для традиційних отворів (рис. 5,а) та для вдуву у отвори в циліндричних заглибленнях (рис. 5,б).

За традиційними отворами (без заглиблень) спостерігаються вихорові структури в формі «ниркового» вихору, які погіршують плівкове охолодження. «Нирковий» вихор розвивається за довжиною ділянки (x/d). Схема з вдувом охолоджувача в отвори в циліндричних заглибленнях забезпечує суттєве зниження інтенсивності масштабу «ниркового» вихору.

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 в циліндричні заглиблення (рис. 6,а) і в ряд традиційних отворів (рис. 6,б). При вдуві охолоджувача в традиційний ряд отворів за рахунок нерівномірності покриття поверхні струменями охолоджувача видно, як ефективність плівкового охолодження стрімко падає. У випадку вдуву охолоджувача в ряд отворів з циліндричними заглибленнями поверхня також покривається охолоджувачем нерівномірно, але схема показує кращі результати, ніж традиційний вдув.

Висновки

Досліджена схема з подачею вторинного потоку через отвори в поверхневих заглибленнях циліндричної форми становить практичний інтерес для використання в газотурбобудуванні при розробці систем охолодження високотемпературних елементів з плівковим охолодженням.

Показано, що схема плівкового охолодження поверхні з подачею охолоджувача в отвори, розміщені в поверхневих поглибленнях циліндричної форми дозволяє збільшити середню по ширині адиабатну ефективність плівкового охолодження у порівнянні з традиційною (без поверхневих заглиблень).

Більш висока ефективність плівкового охолодження при подачі охолоджувача в циліндричні заглиблення обумовлена зниженням інтенсивності вторинних вихорових структур («ниркових» вихорів), також зменшується відрив струменя від поверхні і зростає рівномірність плівкового охолодження в поперечному напрямку через зниження фактора дискретності вдува охолоджувача на охолоджувану поверхню.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення різних факторів впливу, зокрема впливу температурного фактору.

Перелік використаних джерел

1. А.А. Халатов, В.В. Романов, І.І. Борисов. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил // Промышленная теплотехника. — К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины — 2010. — Т.9 — 317 с.
2. Khalatov A. A., Borisov I. I., Dashevsky Yu. J., Kovalenko A. S., Shevtsov S. V. Flat plate film cooling from a single-row inclined holes embedded in a trench: effect of external turbulence and flow acceleration. // Thermophysics and Aeromechanics — 2014. — Vol. 20 — №6 — 713-719 p.
3. Lu Y. Effect of hole configuration on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades // PhD Dissertation Mechanical Engineering — 2007. — 109 p.
4. А.А. Халатов, Н.А. Панченко, І.І. Борисов, В.В. Северина. Компьютерное моделирование пленочного охлаждения при подаче охладителя через отверстия в траншее // Инженерно-физический журнал — 2017. — Том 90 — №3. — 670-677 с.

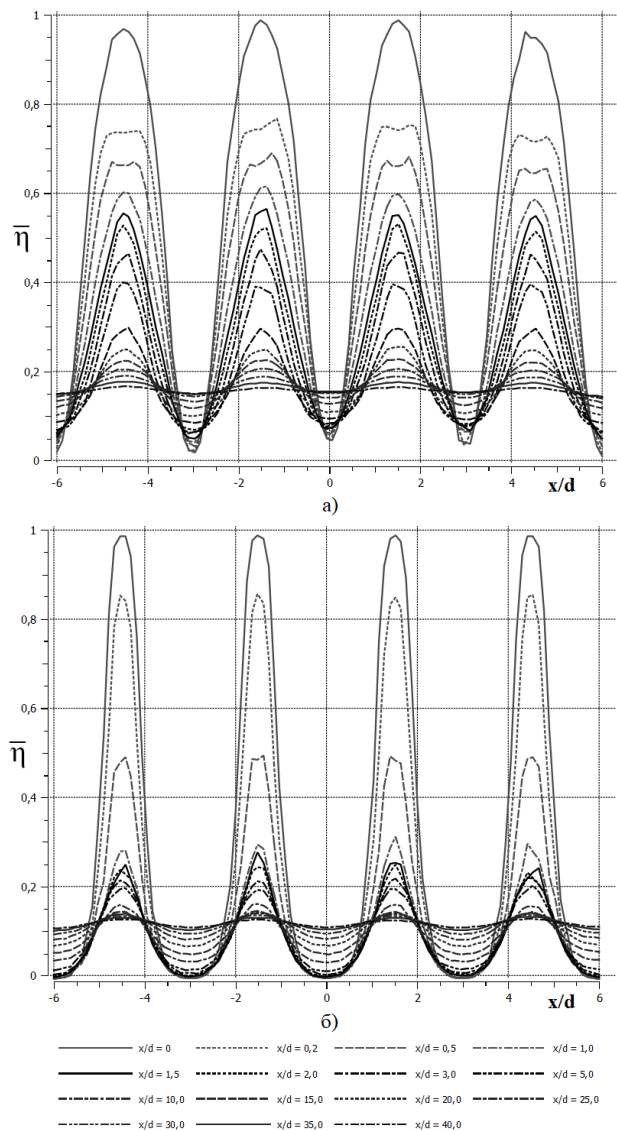


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження при $m=1, 0$: а – отвори в циліндричних заглибленнях; б – традиційний ряд похилих отворів