

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ОБЕРТАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ОТВОРАМИ В НАПІВСФЕРИЧНИХ ЗАГЛИБЛЕННЯХ ТА ТРАНШЕЇ

В. А. Макаренко^{1, а}, М. І. Спасенко¹, 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 при стаціонарній подачі охолоджувача та за умов обертання через один ряд похилих циліндричних отворів в напівсферичних заглибленнях та в поперечній траншеї. В якості базової використовувалася традиційна конфігурація похилих циліндричних отворів (без заглиблень) на плоскій поверхні з аналогічними відносними геометричними розмірами. Дані конфігурації було змодельовано для діапазону параметру вдуву від 0,5 до 2,0 та для діапазону обертів від 0 до 1000. Всі розрахунки були проведені за допомогою комерційного програмного забезпечення ANSYS CFX, що широко використовується при вирішенні різних завдань термогазодинаміки. Наведена порівняльна характеристика течій залежно від параметра вдуву та кількості обертів на хвилину для досліджуваних схем.

Ключові слова: плівкове охолодження, напівсферичні заглиблення, траншея, параметр вдуву, ефективність плівкового охолодження, комп'ютерне моделювання, обертання.

Вступ

Підвищення температури газу перед турбіною є перспективним напрямом вдосконалення різноманітних газотурбінних установок (ГТУ). На сьогодні цей показник сягає 1500 – 1800 °С. Можливість підвищити його обмежується умовами стійкості матеріалу лопаток. Застосовуючи методи зовнішнього захисту стінок, можна досягти потрібної мети. Найкращим способом такого захисту є плівкове охолодження, за умови якого охолоджувач потрапляє на охолоджувану поверхню через внутрішні порожнини лопатки крізь щілину або систему отворів. При використанні традиційних схем зростання температури перед турбіною потребує значного збільшення витрат повітря, яке є охолоджувачем. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати нові схеми, такі як: консольний отвір, кратери, траншея, напівсферичні заглиблення, додаткові бокові отвори та інші [1]. Головною проблемою для багатьох з них стає складна технологія виготовлення. Однак, напівсферичні отвори [2] та поперечна траншея [3] залишаються лідерами серед них з врахуванням технологічності відтворення.

Основною характеристикою плівкового охолодження є ефективність, яка визначається за допомогою виразу:

$$\eta = (T_{aw} - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty}) \quad (1)$$

де T_{∞} – температура основного потоку; T_2 – температура потоку, що вдувається; T_{aw} – температура адіабатичної стінки.

Ефективність плівкового охолодження залежить від значної кількості факторів геометричного та газодинамічного характеру, до них належить: форма отворів, кут нахилу вісі отвору до напрямку основного потоку, кривизна поверхні, відносна довжина отвору, обертання лопатки та інші. Багато з них вже детально вивчені, але умовам обертання на даний момент приділено замало уваги. Тому в роботі досить детально розглянуто вплив цього чинника для трьох найбільш перспективних схем.

1. Комп'ютерне моделювання

Числове моделювання плівкового охолодження було виконано з використанням комерційного пакету ANSYS CFX 14. Дослідження проведено для ідентичних геометричних моделей плівкового охолодження, які відрізняються лише формою заглиблень у поверхні. Схеми конфігурацій наведені на рис. 1. Геометричні параметри були прийняті такими: діаметр падаючих циліндричних отворів $d = 3,2$ мм, кут нахилу отворів до адіабатної поверхні $\alpha = 30^\circ$, крок $t = 9,6$ мм ($t/d = 3,0$); висота траншеї $h = 2,4$ мм ($h/d = 0,75$), діаметр сферичних заглиблень $D = 8$ мм; ($h/D = 0,5$).

У даній роботі для виконання CFD-моделювання було використано комбіновану розрахункову сітку, що була побудована за допомогою генератора ANSYS Mesh для побудови сіток (рис. 2). Сітка являє собою

^аbarbara.makarenko@gmail.com

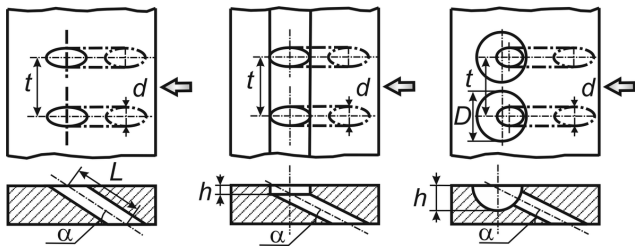


Рис. 1. Досліджені способи плівкового охолодження: а – традиційний ряд похилих отворів; б – отвори в траншеї; в – отвори в напівсферичних заглибленнях

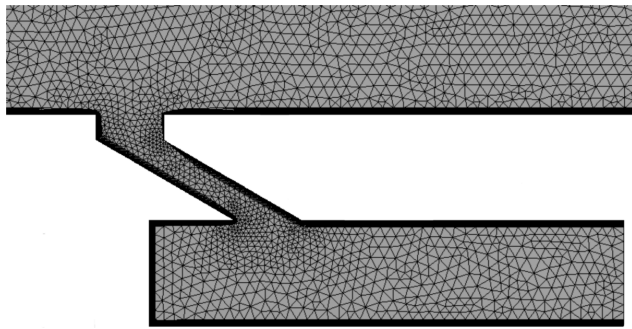


Рис. 2. Розрахункова сітка моделі

комбінацію тетраедричних елементів в області потоку та призматичних елементів в областях згущення біля стінок (415102 вузлів та 1119210 елементів).

Граничні умови на вході і виході були задані близькими до експерименту [3]: тверді границі розрахункової області були задані як для адіабатної стінки ($q = 0$). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії. Рівняння руху у формі Рейнольдса вирішувалося для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці задачі з використанням повного Рейнольдса, що був визначений за еквівалентним діаметром каналу та швидкості основного потоку, рівний $1,25 \cdot 10^5$. Температура основного потоку на вході складала 25°C , потоку, що вдувається – 72°C . На вході у канал середня швидкість основного потоку задавалася 37 м/с . На виході з каналу середній статичний тиск задавався стандартним 101300 Па . Граничні умови, які відповідали значенням параметра вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ наведені на рис. 3. Інтенсивність турбулентності прийнята за 1% .

2. Результати та їх аналіз

Результати розрахунків середньої ефективності плівкового охолодження для схем, що досліджувалися, представлені на рис. 4. З наведених графіків видно, що при малих значеннях $m = 0,5$ та на основній ділянці $x/d > 20$ усі схеми мають такі значення ефективності плівкового охолодження, що відрізняються не значно одне від одного. Збільшення ефективності плівкового охолодження за малих значень параметра вдуву спостерігається на початковій стабілізаційній ділянці ($x/d = 0 \dots 20$) для схем з подачею охолоджувача в траншею. За помірних та високих значень параметра вдуву ($m \geq 1,0$) різниця в ефективності стає суттєвою для схем плівкового охолодження, що

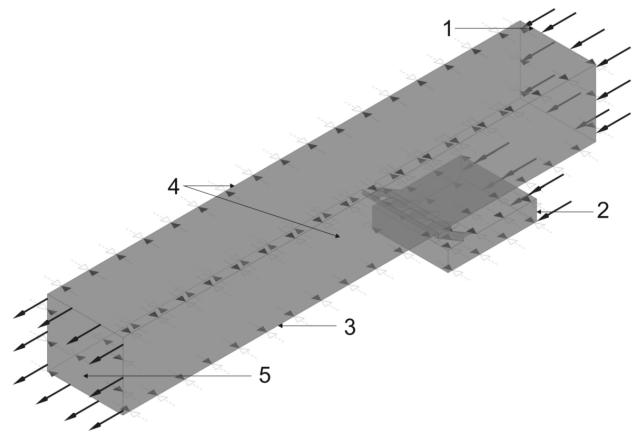


Рис. 3. Геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через отвори у траншеї: 1 – вхід основного потоку; 2 – вхід повітря, що вдувається; 3 – адіабатна стінка; 4 – умови симетрії; 5 – вихід

були розглянуті. Особливо це помітно для схем з подачею охолоджувача в траншею, що показує найбільшу ефективність плівкового охолодження.

Вплив обертання на адіабатну ефективність плівкового охолодження плоскої пластини було досліджено за двох значень частоти обертання $n = 700$ та 1000 об/хв .

Роль параметра, що визначає та характеризує вплив обертання на теплогідрравлічні характеристики систем охолодження, у спеціальній літературі відіграє параметр обертання, який визначається наступним чином:

$$Ro = \Omega \cdot r / w_\infty \quad (2)$$

де Ω – кутова швидкість обертання поверхні, що охолоджується; r – радіус обертання; w_∞ – швидкість основного потоку в каналі.

За частоти обертання $n = 700 \text{ об/хв}$ та 1000 об/хв значення параметра обертання будуть $Ro = 2,0$ та $Ro = 2,5$ відповідно. У стаціонарному випадку ($n = 0$) параметр обертання буде дорівнювати нулю.

На рис. 5 представлена середня по поверхні ефективність плівкового охолодження двох досліджуваних схем з заглибленнями у поверхні для стаціонарних умов та в умовах обертання. Під впливом обертання спостерігається незначне підвищення середньої по поверхні ефективності плівкового охолодження. Особливо це помітно для схеми з отворами в траншеї.

На рис. 6, 7 показана ефективність плівкового охолодження в поперечному напрямку для різноманітних значень x/d для схеми з виводом охолоджувача в траншею (рис. 6) та в напівсферичні заглиблення (рис. 7) для стаціонарних умов та в умовах обертання для параметра вдуву $m = 1,0$.

На графіках спостерігається зсув піків ефективності плівкового охолодження в результаті обертання охолоджуваної поверхні. Ефект обертання достатньо сильно проявляється у схемі з виводом охолоджувача в напівсферичні заглиблення. Та це не спричиняє

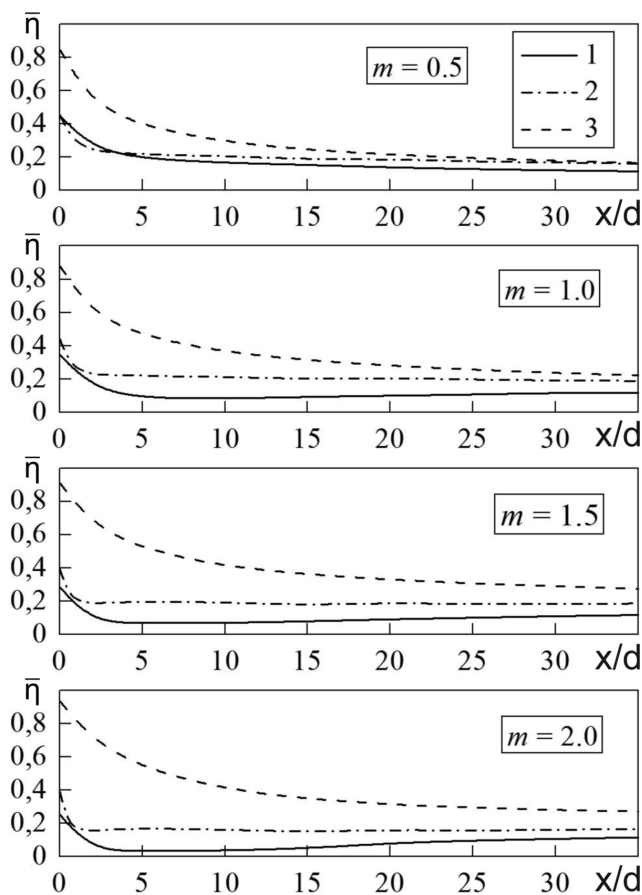


Рис. 4. Середня по ширині ефективність плівкового охолодження: 1 – традиційний ряд похилих отворів; 2 – отвори в траншеї; 3 – отвори у напівсферичних заглибленнях

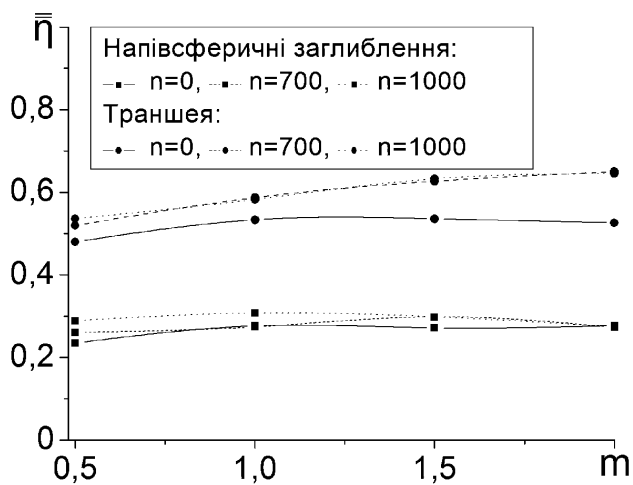


Рис. 5. Середня по поверхні ефективність плівкового охолодження; n – кількість обертів на хвилину

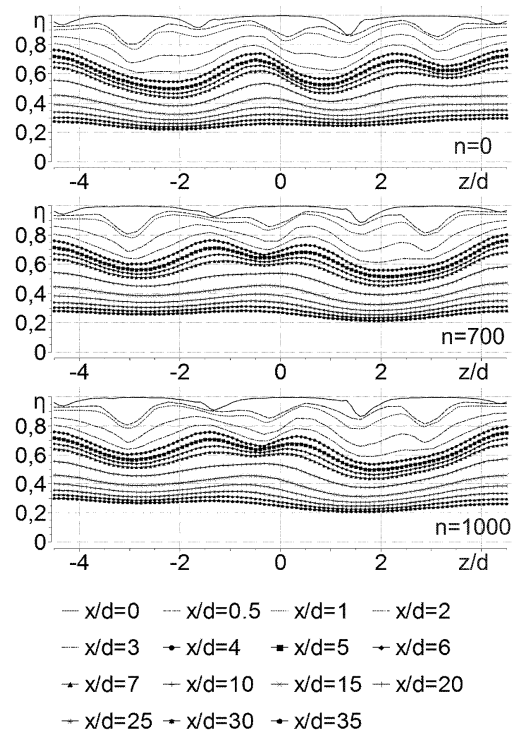


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження у поперечному напрямку при $m = 1,0$ з видовом охолоджувача в поперечну траншею

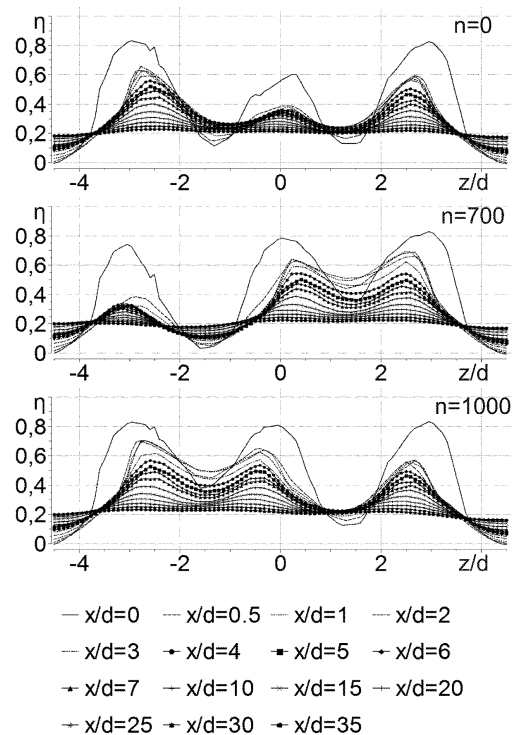


Рис. 7. Локальна ефективність плівкового охолодження у поперечному напрямку при $m = 1,0$ з видовом охолоджувача в напівсферичні заглиблення

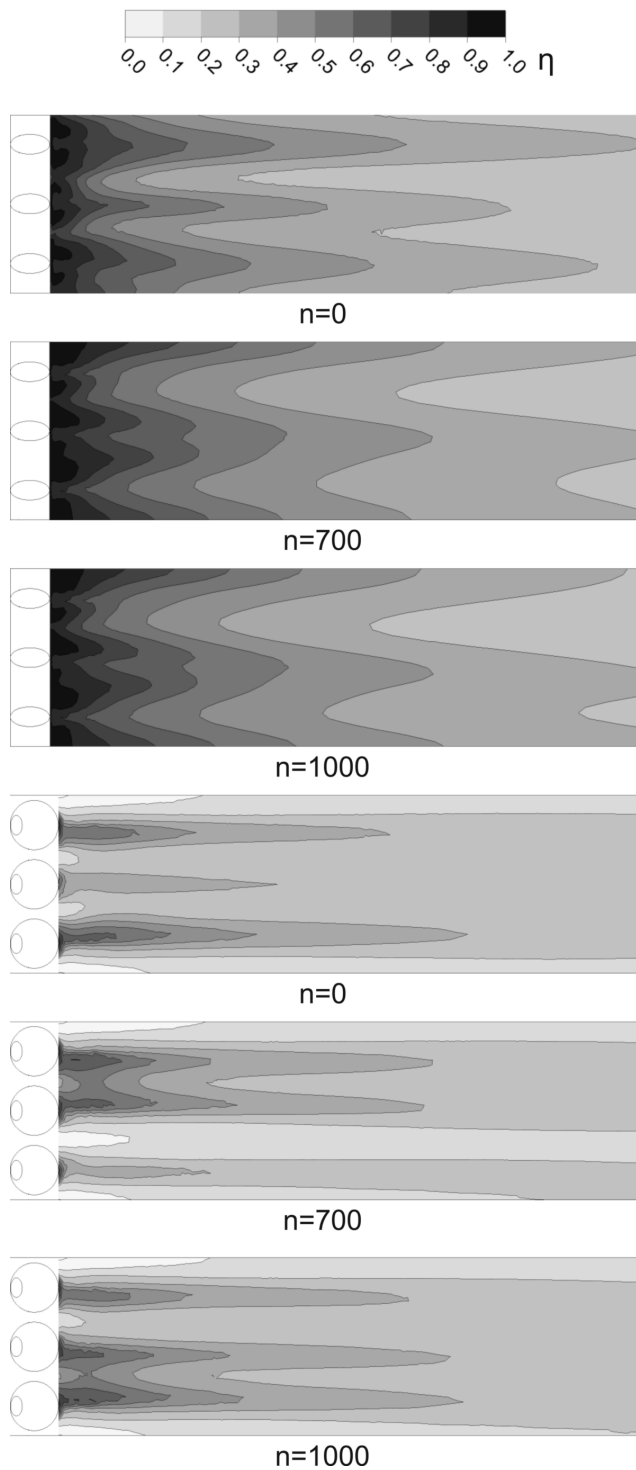


Рис. 8. Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження за отворами в траншеї та отворами в напівсферичних заглибленнях на ділянці $0 \leq x/d \leq 30$ при $m = 1,0$

суттєве викривлення або нерівномірність поля ефективності плівкового охолодження в шарі охолоджувача.

Обертання пластини спричиняє зміщення ізоліній локальної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямку, що показано на рис. 8. Це відбувається внаслідок відхилення течії охолоджувача від осевого напрямку під впливом відцентрових та кореолісових сил.

Таким чином, можна зробити висновок, що вплив заданих параметрів обертання на ефективність плівкового охолодження для досліджуваних схем з заглибленнями у поверхні не значний.

Висновки

Виконане порівняльне теоретичне дослідження ефективності плівкового охолодження та фізичної структури потоку за двома перспективними однорядними схемами плівкового охолодження з подачею охолоджувача через отвори в траншеї та напівсферичних заглибленнях під впливом обертання охолоджуваної поверхні.

Обертання поверхні, що охолоджується, спричиняє зміщення потоку та піків локальної ефективності плівкового охолодження. Не зважаючи на даний факт, спостерігається незначне підвищення середньої по поверхні ефективності плівкового охолодження для обох розглянутих схем.

Перелік використаних джерел

1. Dittmar J., Schulz A., Wittig S. Assessment of various film cooling configurations including shaped and compound angle based on large scale experiments // *Journal of Turbomachinery*. — 2003. — Vol. 125, no. 1. — P. 57–64.
2. Халатов А. А., Варганов И. С., Коваленко Г. В. Патент України № 47749. Способ пленочного охлаждения и устройство для его осуществления // Заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики НАН Украины. — 2003. — Т. 125, № 2001096063.
3. Flat plate film cooling from a single-row inclined holes embedded in a trench: effect of external turbulence and flow acceleration / A. A. Khalatov, I. I. Borisov, Yu. Ya. Dashevskiy et al. // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2013. — Vol. 20, no. 6. — P. 713–719.