

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ КРИВОЛІНІЙНОЇ ПОВЕРХНІ З ОДНОРЯДНОЮ ПОДАЧЕЮ ОХОЛОДЖУВАЧА В ТРИКУТНІ ЗАГЛИБЛЕННЯ

А. В. Шуляк^{1, а}, Т. В. Доник²

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Робота присвячена дослідженню впливу криволінійності поверхні з однорядними трикутними заглибленнями для вприску вторинного охолоджувача на ефективність плівкового охолодження, а також дослідженню впливу обертання на ефективність плівкового охолодження криволінійної пластини. Дослідження виконано у програмному пакеті Ansys 19.2 для параметрів вдуву $m = 0.5, 1, 1.5$. Отримано, що криволінійна поверхня увігнутої форми зменшує ефективність плівкового охолодження, обертання спричиняє появи асиметрій ефективності плівкового охолодження.

Ключові слова: плівкове охолодження, криволінійність, обертання, трикутні заглиблення, комп'ютерне моделювання

Вступ

Охолодження лопаток турбін газотурбінних установок є однією із найважливіших проблем сучасної енергетики, оскільки високі температури робочого тіла можуть виводити з ладу або пошкоджувати газотурбінні установки, що може спричинити проблеми із їх експлуатацією.

Щоб уникнути негативного впливу високих температур застосовуються термостійкі матеріали або покриття, внутрішнє та зовнішнє охолодження.

Одним із основних типів зовнішнього охолодження є плівкове охолодження, що являє собою вприскування охолоджувача через отвори, які закладаються на етапі проектування турбіни.

Для опису плівкового охолодження використовується величина ефективності охолодження:

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

Де T_{aw} — температура поверхні, яку захищають від високої температури основного потоку, T_{∞} — температура основного потоку, T_2 — температура охолоджувача на виході з отворів [1, 2].

У даній роботі проведено дослідження ефективності плівкового охолодження для випадку плоскої поверхні та криволінійної увігнутої поверхні та при умовах обертання з частотами 3000 та 5000 об/хв у програмному симуляційному середовищі, оскільки проведення експериментального дослідження є проблематичним та коштовним.

1. Комп'ютерна модель

Проведення математичного моделювання фізичної задачі плівкового охолодження проведено у симуляційному програмному комплексі Ansys 19.2.

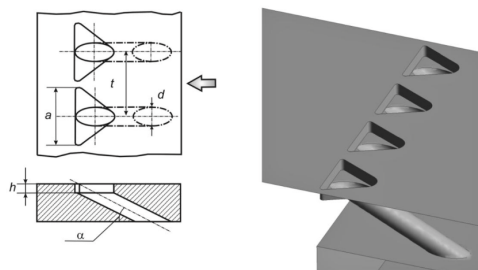


Рис. 1. Схема трикутних заглиблень

У роботі було використано дві геометричні моделі. Моделі склалися із каналу прямокутного перерізу, в який втікає основний потік і подається охолоджувач через отвори у поверхні із зовнішнього джерела. Радіус кривизни криволінійної поверхні пластини складає 60 см.

Просторові розміри співставні з тими, що мають реальні лопатки газових турбін з плівковим охолодженням: радіус отворів 0.8 мм, поперечний крок заглиблень $t = 2,4$ мм, висота траншеї $h = 0.6$ мм, висота заглиблення трикутних отворів $h = 0.4$ мм, кут нахилу отворів $\alpha = 30$. Схема заглиблень наведена на рис. 1.

Геометричні моделі були побудовані у пакеті Ansys Workbench Geometry (рис. 2), розрахункова сітка була побудована у пакеті Ansys Workbench Mesh

^аantonshulyak@gmail.com

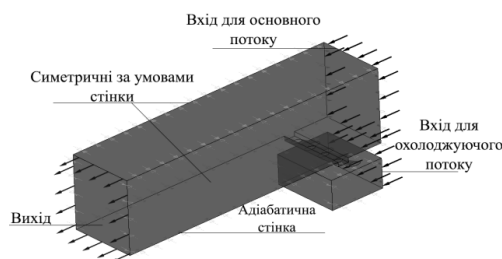


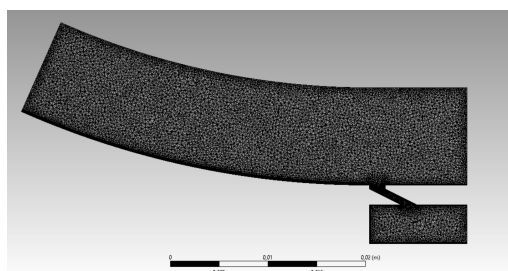
Рис. 2. Геометрія моделі з плоскою поверхнею

(рис. 3(а)). Для побудови сітки була використана функція inflation для згущення сітки поблизу поверхні, що особливо необхідно було для більш чіткого дослідження примезових явищ (рис. 3(б)). Сітка була комбінованою і складалася із тетраедричних елементів та призматичних у областях згущення.

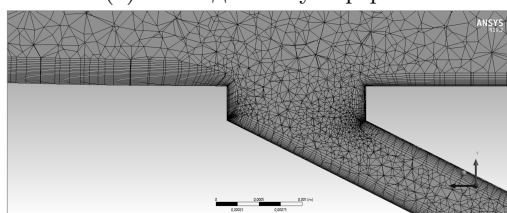
Розмір елементів сітки був збалансований між швидкістю розрахунків та їх точністю. Для плоскої поверхні сітка мала 2.2 млн елементів, для криволінійної близько 3 млн елементів, оскільки для криволінійної поверхні потрібно було більш точно оцінювати потік поблизу криволінійної поверхні.

Вторинний потік мав такі значення параметри вдуву для плоскої та криволінійної пластини $m = 0.5$; 1; 1.5, та для дослідження криволінійності за частот $n = 3000$ об/хв та $n = 5000$ об/хв використаний параметр вдуву $m = 1$. Значення параметра вдуву відповідають тим, що застосовуються у реальних схемах плівкового охолодження.

Основний потік мав швидкість 40 м/с та температуру 400 С. Турбулентність потоків складала 1 % у моделі турбулентності SST, яка найчастіше використовується для моделювання плівкового охолодження, стінки вважалися такими, що не поглинають та віддають тепло. Бічні стінки мали умови симетрії. Рівняння Нав'є-Стокса усереднювалися по Рейнольдсу.



(а) Вигляд сітки у перерізі



(б) Згущення сітки поблизу поверхні

Рис. 3. Розрахункова сітка криволінійної моделі

2. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання

Ефективність плівкового охолодження залежить від великої множини факторів, наприклад, від величини прискорення основного потоку [3]. В даній роботі буде розглянутий фактор криволінійності та обертання.

2.1. Ізолії локальної ефективності плівкового охолодження

Отримані в результаті ізолії локальної ефективності плівкового охолодження для плоскої (рис. 4) та криволінійної поверхні (рис. 5), які розраховані за параметрів вдуву $m = 0.5, 1, 1.5$.

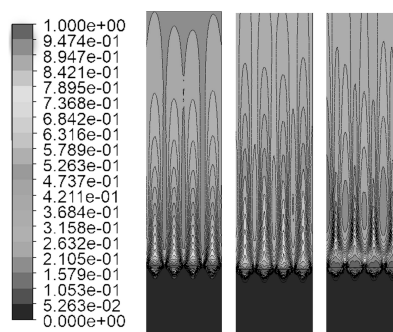


Рис. 4. Ізолії локальної ефективності плівкового охолодження для плоскої пластини на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$. Зліва направо значення параметрів вдуву $m = 0.5, 1, 1.5$

Ізолії локальної ефективності не мають явних асиметрій та рівномірно розподіляються по плоскій та криволінійній пластині при параметрах вдуву 0.5 та 1, що є хорошим фактором для ефективного охолодження пластини.

За параметра вдуву 1.5 потік для плоскої та криволінійної пластини робиться менш рівномірним і активно зміщується з основним потоком, що негативно впливає на охолодження пластин.

Ізолії локальної ефективності для обох поверхонь є схожими на ділянці біля виходу з отворів, від початку середини пластини криволінійна пластина має нижчу ефективність охолодження.

2.2. Усереднення ефективності по ширині пластини

Проведений аналіз та візуалізація усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження з розбиттям, яке вказане на рисунку 6, для плоскої пластини (рис. 7), криволінійної пластини (рис. 8) та криволінійної пластини із обертанням (рис. 9) на ділянці $0 \leq x/d \leq 40$.

Для плоскої пластини помітно, що ефективність плівкового охолодження зростає при рості параметру вдуву до $m = 1$ та рівномірно розподіляється між рядами. В порівнянні із криволінійною поверхнею, плоска поверхня має кращу ефективність плівкового

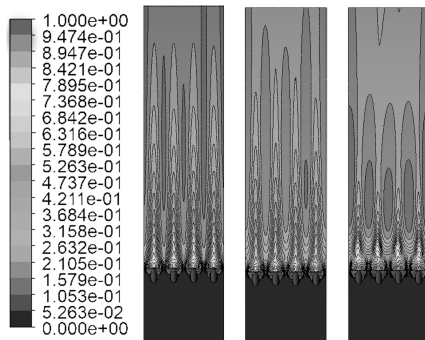


Рис. 5. Ізолнії локальної ефективності плівкового охолодження для криволінійної пластини $0 \leq x/d \leq 40$. Зліва направо значення параметрів вдуву $m = 0.5, 1, 1.5$

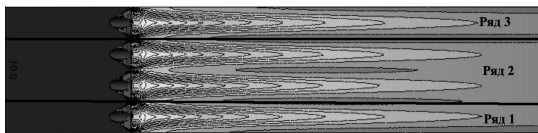
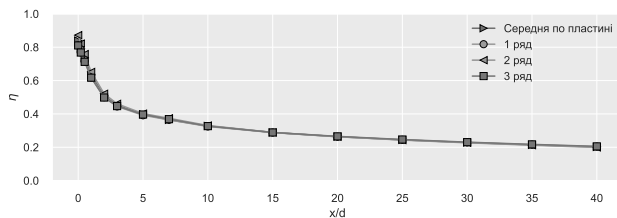
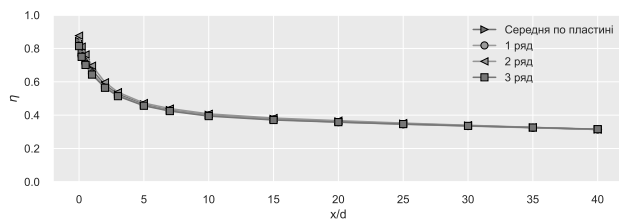


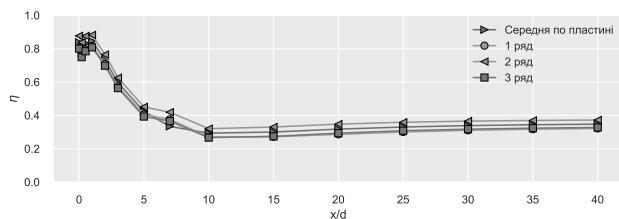
Рис. 6. Розбиття пластини по областях усереднення охолодження, це можна пояснити тим, що увігнута форма сприяє змішуванню основного та вторинного потоку, оскільки основний потік врізається у вторинний потік.



(а) $m = 0.5$



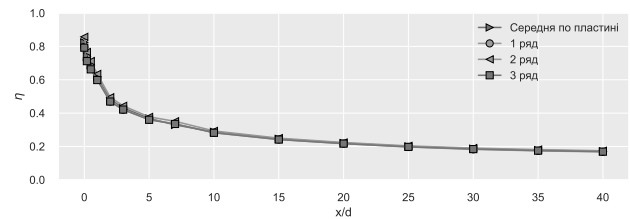
(б) $m = 1$



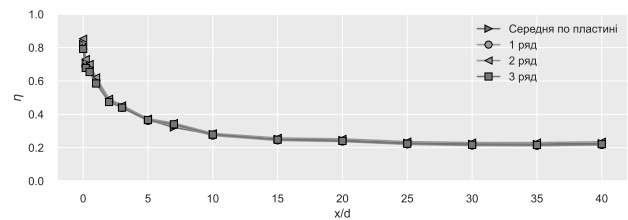
(в) $m = 1.5$

Рис. 7. Локальна ефективність плівкового охолодження при параметрі вдуву 0.5, 1, 1.5 для плоскої пластини

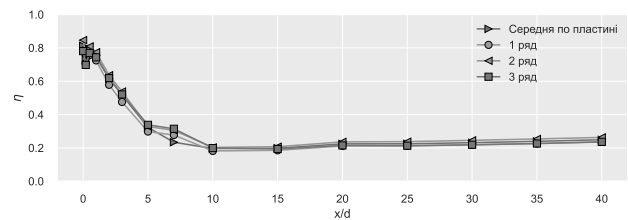
При значенні параметру вдуву вторинного потоку $m = 1.5$ ефективність плівкового охолодження криволінійною та плоскої поверхні зменшується, відносно значень $m = 0.5$ та $m = 1$, і змінюється характер залежності, з появою мінімуму в області $10 d$ від отворів, це вказує на те, що вторинний потік відривається від поверхні пластини і менш ефективно утворює плівку на ній.



(а) $m = 0.5$



(б) $m = 1$



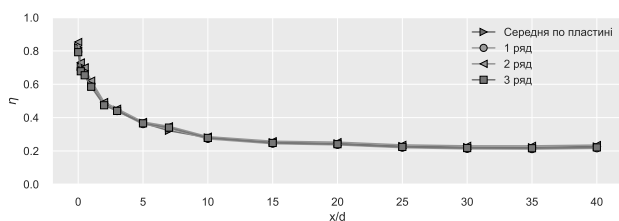
(в) $m = 1.5$

Рис. 8. Локальна ефективність плівкового охолодження при параметрі вдуву 0.5, 1, 1.5 для криволінійної пластини

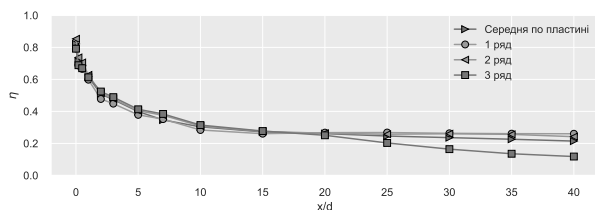
Зменшення ефективності при параметрі вдуву $m = 1.5$ можна достатньо легко пояснити тим, що при сильному вдуві охолоджувача до основного, він не може ефективно утворити плівку, яка огортає поверхню, і змішується із основним потоком. Криволінійна поверхня увігнутої кривизни сприяє ефекту змішування вторинного охолоджуючого потоку з основним потоком.

При аналізі потоку на криволінійній поверхні помітно, що обертання моделі, завдяки дії центробіжних та Коріолісових сил, відносить потік в протилежну до осі обертання сторону, що спричиняє виникнення розбіжностей в усередненій ефективності плівкового охолодженням по рядах пластини.

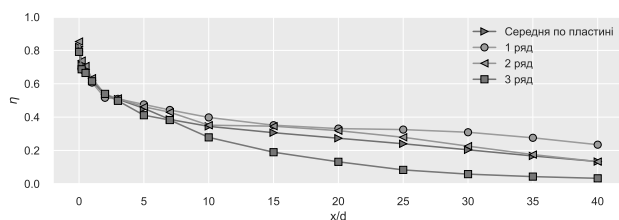
При частоті обертання 3000 об/хв усереднена ефективність плівкового охолодження змінюється по рядах на відстані $20 d$ від отворів, при частоті обертання 5000 об/хв на відстані $10 d$. Більша частота обертання створює більшу асиметрію ефективності плівкового охолодження.



(а) $n = 0$ об/хв



(б) $n = 3000$ об/хв



(в) $n = 5000$ об/хв

Рис. 9. Локальна ефективність плівкового охолодження при параметрі вдуву $m = 1$ для криволінійної пластини при різних значеннях частоти обертання

Висновки

Дана робота присвячена дослідженню плівкового охолодження на пласку та криволінійну пластини з

однорядними трикутними заглибленнями в які впри-
скується охолоджувач при впливі обертання.

В ході роботи встановлено, що криволінійна по-
верхня увігнутою форми зменшує локальну ефекти-
вність плівкового охолодження для значень параме-
тру вдуву 0.5, 1, 1.5. При параметрі вдуву 1.5 спо-
стерігаємо зниження ефективності плівкового охо-
лодження, та утворення асиметрії охолодження по
рядах пластини.

Обертання пластини спричиняє зміщення потоку
в напрямку по радіусу обертання, що спричиняє
зниження ефективності охолодження та утворенню
великих асиметрій по рядах поверхні.

Перелік використаних джерел

1. Теплообмен и гидродинамика в полях центро-
бежных массовых сил : монография / Хала-
тов. А. А., Борисов И. И., Дашевский. Ю. Я. и
Резник. С. Б. — Киев : НТУУ «КПИ», Изд-во
«Политехника», 2016. — С. 238 с.
2. А. Халатов А. Теплообмен и гидродинамика в
полях массовых сил. — №. 4. изд. — Инженерно-
физический журнал, 2010. — С. 743–756.
3. Coletti F., Elkins C.J., Eaton J.K. Three-
dimensional velocity measurements of film cooling
flow under favorable pressure gradient [Electronic re-
source]. — Proceedings of ASME Turbo Expo-2012.-
GT2012-69402, 2012. — P. 12.