

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛАСКОЇ ПОВЕРХНІ З ДВОХРЯДНОЮ СИСТЕМОЮ ТРИКУТНИХ ЗАГЛИБЛЕНЬ: ВПЛИВ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА

М. В. Моця^{1,а}, Т. В. Доник²

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація

У статті представлено результати комп'ютерного моделювання плівкового охолодження плоскої поверхні дворядної системи трикутних заглиблень при впливі різнонаправленості охолоджувача. Дана задача реалізована за допомогою програмного забезпечення Ansys 2023 R1. Основну увагу приділено порівняльному аналізу розрахунків ефективності, отриманих із застосуванням значень числа

$$m = 1$$

та зовнішньою турбулентністю $t = 1$.

Ключові слова: плівкове охолодження, газова турбіна, комп'ютерне моделювання, ефективність охолодження, трикутні заглиблення.

Вступ

Безперебійне енергозабезпечення лежить в основі функціонування будь-якої сучасної індустрії. Бурхливий технологічний розвиток минулого століття подарував людству низку революційних винаходів, проте поточні виклики вимагають дещо іншого підходу. Сучасні науковці зосереджують свою увагу не на пошуку принципово нових машин, а на форсуванні робочих характеристик традиційного енергетичного обладнання. Найвиразнішим прикладом агрегатів, що потребують постійного підвищення ефективності, є газотурбінні установки. Завдяки своїй високій питомій потужності вони стали незамінним рушієм реактивної авіації, морського флоту та глобальних систем транспортування природного газу. Зважаючи на такі масштаби їх експлуатації, оптимізація робочих процесів у цих турбінах є надзвичайно актуальним завданням сьогодення.

Прагнення підвищити ККД газотурбінних установок вимагає збільшення температури робочого тіла, яка вже давно перевищила межу термічної стійкості металів у $1000 - 1300^\circ\text{C}$. Саме тому ефективним шляхом подолання проблеми є використання систем плівкового охолодження лопаток [1]. Проектування та перевірка таких систем ефективно здійснюється за допомогою комп'ютерного моделювання, що суттєво економить час і ресурси. Головним критерієм якості теплового захисту традиційно виступає ефективність плівкового охолодження [2], яка визначає-

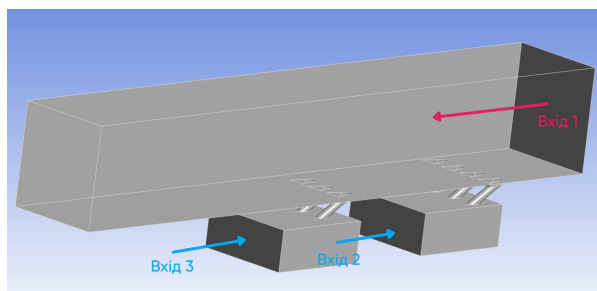


Рис. 1. Комп'ютерна модель дворядної системи трикутних заглиблень

ться за співвідношенням:

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

де T_∞^* — повна температура основного потоку, T_2^* — повна температура охолоджувача, а T_{aw} — адіабатична температура захищуваної поверхні.

Ключовою характеристикою процесу формування захисної плівки є параметр вдуву. Його величина дорівнює відношенню масових швидкостей вторинного та основного потоків:

$$m = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_\infty w_\infty} \quad (2)$$

де ρ_2 та ρ_∞ — густина охолоджувача та основного потоку відповідно, а w_2 та w_∞ — їхні швидкості [3, 4].

Метою даної роботи є дослідження впливу напрямку подачі охолоджувача на плівкове охолодження у

^аololoevvko@gmail.com

дворядній системі трикутних заглиблень. Зважаючи на мікромасштабність геометрії, що критично ускладнює проведення натурних вимірювань, дослідження виконано методом комп'ютерного 3D-моделювання (CFD) у програмному комплексі ANSYS 2023 R1.

1. Об'єкт дослідження та комп'ютерна модель

Комп'ютерне моделювання було реалізовано за допомогою програмного забезпечення Ansys 2023 R1. Розрахункова область для комп'ютерного моделювання сформована як канал із прямокутним перерізом. Відповідно до поширених конфігурацій систем теплового захисту, впорскування холодоагенту організовано через дворядну структуру спеціальних трикутних заглиблень, глибина яких складає $h = 0,4$ мм. Безпосередня подача газу в ці заглиблення відбувається по циліндричних трубах діаметром $d = 0,8$ мм.

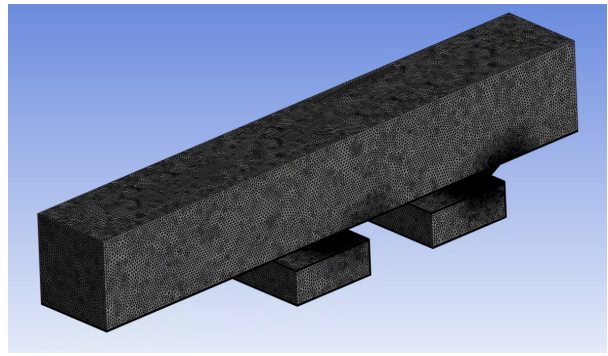
Важливою особливістю обраної схеми є різнонаправленість просторових осей цих каналів. Крок між сусідніми отворами в поперечному напрямку дорівнює $t = 2,4$ мм (відносний крок $t/d = 3$). Для ефективного формування захисної плівки кут інжекції відносно твердої стінки зафіксовано на рівні $\alpha = 30^\circ$. рис. 1. Окрім просторових характеристик, розрахункова модель враховує фіксовані газодинамічні параметри потоків: число вдуву $m = 1$, а рівень зовнішньої турбулентності потоку на вході був встановленим 1%.

Граничні умови розрахункової моделі базуються на типових експлуатаційних характеристиках малопотужних енергетичних газових турбін наземного базування. На вхідній межі основного каналу (Вхід №1) задано швидкість гарячого газу 400 м/с при температурі 1100 °С. Температура інжектowanego охолоджувального повітря становить 500 °С.

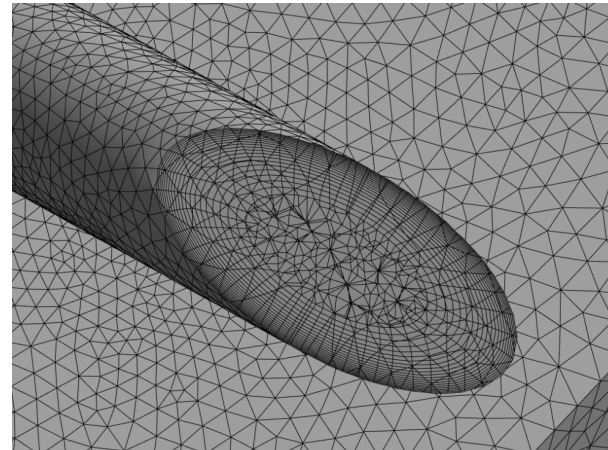
На вихідній межі підтримується постійний статичний тиск 10^6 Па. Ступінь турбулізації набігаючого потоку на вході прийнято рівним 1%. Бічні площини розрахункової області мають умови симетрії, а всі тверді стінки вважаються ідеально теплоізолюваними (адіабатними). З огляду на підтверджену в літературі надійність для задач такого класу [5], замикання системи рівнянь здійснювалося за допомогою моделі турбулентності SST.

2. Розрахункова сітка

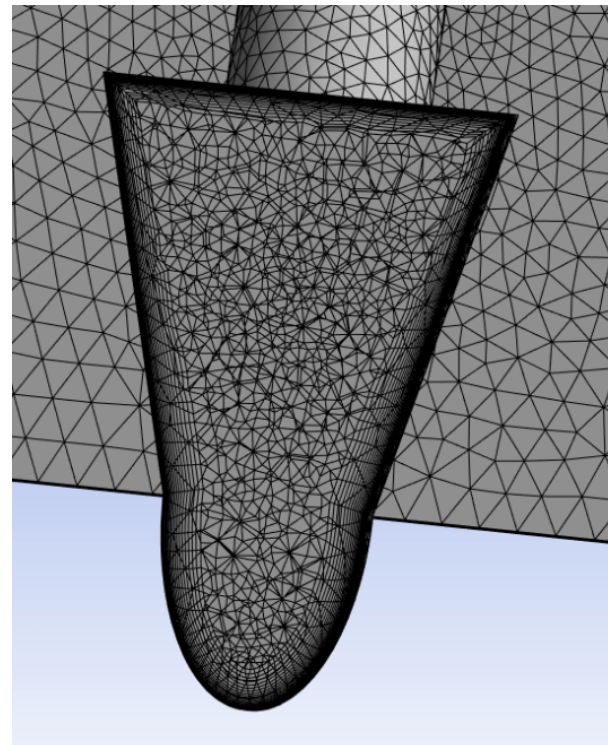
Просторова дискретизація розрахункової області є одним із найбільш відповідальних етапів чисельного моделювання, оскільки від топології та густини сітки безпосередньо залежить баланс між точністю отриманих даних і витратами обчислювальних ресурсів. Оскільки грубе розбиття простору може призвести до некоректного відтворення складної геометрії трикутних заглиблень та аеродинамічних ефектів, у роботі застосовано щільну розрахункову сітку. Це вимагає більшого часу на обчислення, проте дозволяє максимально точно вловлювати дрібномасштабні турбулентні структури потоку.



(а) Загальна сітка моделі



(б) Розрахункова сітка досліджуваної моделі всередині отвору



(в) Розрахункова сітка досліджуваної моделі всередині трикутного заглиблення

Рис. 2. Розрахункова сітка

Для генерації сітки використовувався модуль ANSYS Mesh із застосуванням методів глибокого ручного налаштування. Такий підхід дав змогу локально керувати розміром, формою та концентрацією комірок у критичних зонах, зокрема, поблизу отворів інжекції та всередині заглиблень. З огляду на складність геометрії, було обрано неструктурований тип сітки, який відзначається високою гнучкістю. Основний об'єм розрахункового домену заповнено тетраедричними елементами. Для коректного розв'язання течії у в'язкому підшарі біля всіх твердих стінок використано функцію локального згущення (Inflation), яка формує шари з призматичних комірок. Оскільки в дослідженні розглядаються дві різні конфігурації інжекції, було згенеровано дві відповідні сітки. Для моделі зі співнапрямленими охолоджувальним та основним потоками сітка налічує 1 463 849 вузлів та 4 917 183 елементи. Для конфігурації з різнонапрямленою подачею холодоагенту розрахункова сітка є дещо щільнішою і містить 1 511 261 вузол та 5 085 952 елементи рис. 2

3. Результати моделювання та їх обговорення

На рис. 3] представлено поля адіабатної ефективності плівкового охолодження дворядної системи трикутних заглиблень для конфігурацій зі співнапрямленим (а) та різнонапрямленим (б) потоком охолоджувача. Для детальнішого кількісного аналізу на рис.[4] та рис.[5] представлено розподіл локальної ефективності плівкового охолодження в поперечному перерізі для конфігурацій з різнонапрямленою та співнапрямленою подачею холодоагенту відповідно.

Порівняльний аналіз цих графіків чітко демонструє ключову різницю у фізиці формування захисної плівки. У випадку співнапрямлених потоків (рис. 5)) спостерігаються яскраво виражені локальні максимуми ефективності безпосередньо на осях інжекційних отворів, однак між струменями виникають глибокі провали — зони з мінімальним рівнем теплового захисту. Натомість різнонапрямлена інжекція (рис. [4] забезпечує значно інтенсивніше поперечне розтікання охолоджувача всередині трикутних заглиблень. Хоча абсолютні пікові значення на осях тут дещо нижчі, провали між струменями є значно менш глибокими. Це свідчить про формування більш рівномірної та суцільної захисної плівки.

Ця особливість структури течії безпосередньо впливає на розподіл середньої по ширині ефективності плівкового охолодження η вздовж відносної поздовжньої координати x/d , що наведено на рис.[6]. На обох кривих присутні два характерні піки, які відповідають зонам витікання холодоагенту з першого $x/d = 0$ та другого $x/d \approx 25$ рядів заглиблень. Як видно з графіка, крива середньої по ширині ефективності для співнапрямленої подачі локально проходить вище, ніж для різнонапрямленої на більшості ділянок. Математично це зумовлено тим, що екстремально високі значення на осях струменів при співнапрямленому вдвічі суттєво зміщують усереднений показник

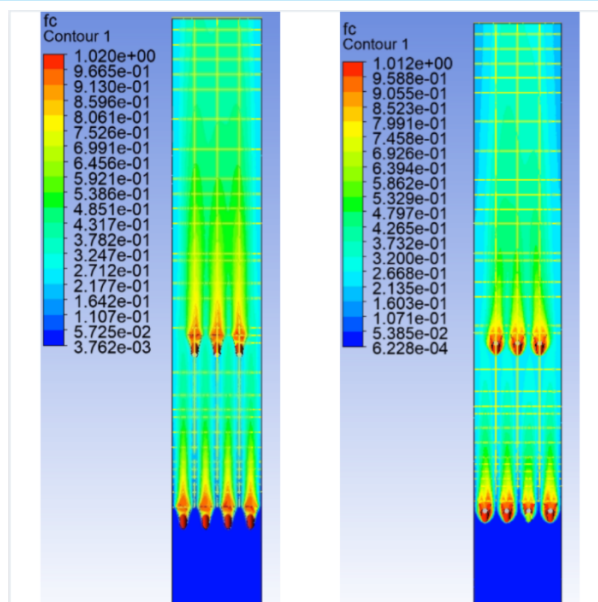


Рис. 3. Поля адіабатної ефективності плівкового охолодження дворядної системи трикутних заглиблень для а) — співнапрямленого потоку охолоджувача; б) — різнонапрямленого потоку охолоджувача

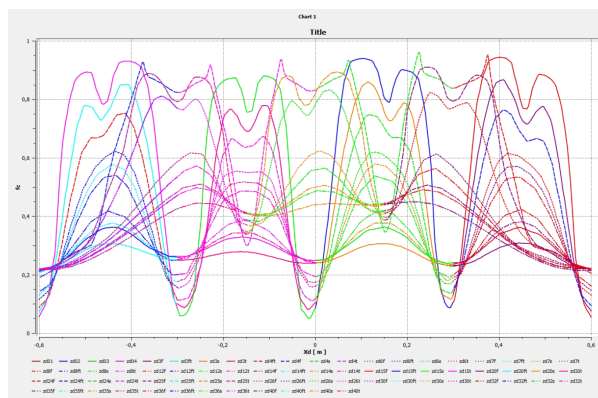


Рис. 4. Локальна ефективність плівкового охолодження різнонапрямленого потоку охолоджувача для плоскої поверхні дворядної системи трикутних заглиблень

вгору, нівелюючи наявність незахищених ділянок між ними при розрахунку середнього значення по лінії.

Оцінка надійності системи теплового захисту виключно за середнім по ширині ефективності є неповною. При переході до аналізу просторового розподілу адіабатної температури та розрахунку інтегральної середньоповерхневої ефективності, тобто по всій площі досліджуваної пластини, спостерігається зворотна картина: система з різнонапрямленими потоками виявляється більш ефективною. Завдяки кращому перемішуванню та інтенсифікації поперечного масоперенесення, різнонапрямлена конфігурація ефективно зливає сусідні струмені. Це не лише мінімізує термічні напруження в матеріалі стінки через відсутність різких температурних градієнтів, але й забезпечує надійніший загальний тепловий захист

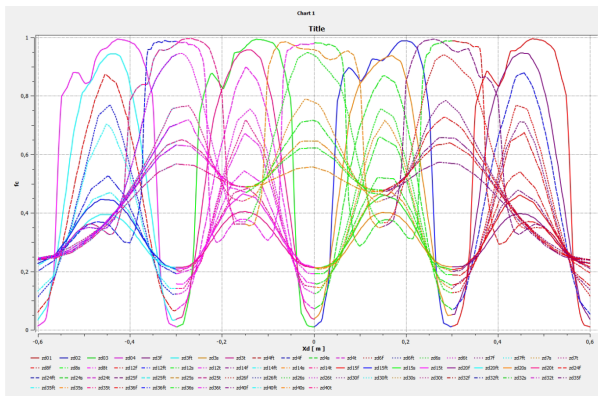


Рис. 5. Локальна ефективність плівкового охолодження співнапрявленого потоку охолоджувача для плоскої поверхні дворядної системи трикутних заглиблень

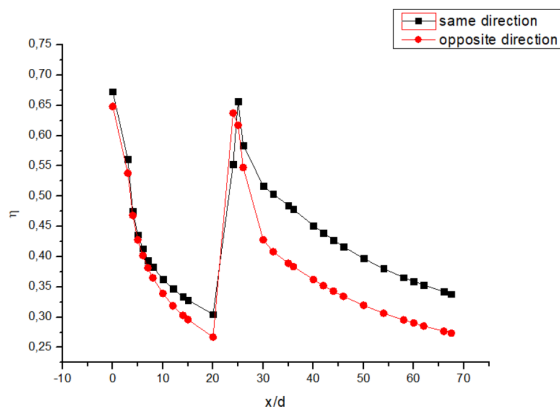


Рис. 6. Середня по ширині ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні дворядної системи трикутних заглиблень

робочій поверхні порівняно зі співнапрявленою схемою.

Аналіз векторних полів швидкості пояснює аеродинамічні причини різної ефективності теплового захисту. При співнапрявленій інжекції (рис. [7]) над кожним отвором формуються класичні парні вихори зворотного обертання (CRVP). Вони інтенсивно затягують гарячий основний газ під струмінь холодоагенту та спричиняють його вертикальний відрив від стінки. Через ізолюваність цих вихорів поперечне розтікання газу є мінімальним, що зумовлює появу незахищених «гарячих плям» між отворами.

Натомість при різнонапрявленій подачі (рис. 8) структура CRVP суттєво деформується завдяки взаємодії зустрічних струменів. Вихори стають ширшими та притискаються до поверхні. Це пригнічує інтенсивність вертикального підйому (відриву) струменів та значно стимулює їх латеральне (поперечне) розтікання. Охолоджувач ефективно заповнює простір між отворами, що фізично пояснює формування суцільної захисної пелени та вищу загальну (середню по пластині) ефективність охолодження.

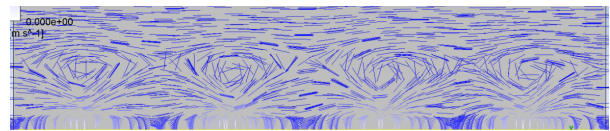


Рис. 7. Вихрова структура при співнапрявлених потоках

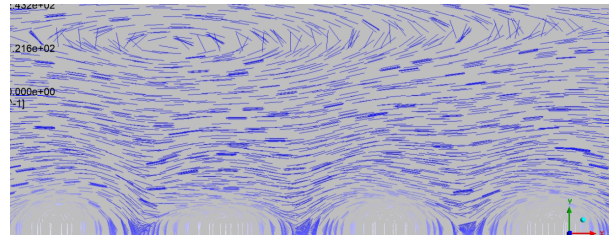


Рис. 8. Вихрова структура при різнонапрявлених потоках

Висновки

Досліджено ефективність плівкового охолодження та просторову структуру течії за двома схемами подачі охолоджувача в систему трикутних заглиблень: зі співнапрявленим та різнонапрявленим вдювом. Розглянуті конфігурації становлять значний практичний інтерес для вдосконалення систем теплового захисту лопаток сучасних газових турбін, оскільки просторова орієнтація інжекційних отворів дозволяє керувати розподілом охолоджувача по поверхні.

В результаті аналізу отриманих даних при параметрі вдюву $m = 1$ встановлено характерну особливість формування захисної плівки. Показано, що схема зі співнапрявленими потоками демонструє вищі значення середньої по ширині ефективності. Проте аналіз локальної ефективності доводить, що різнонапрявлений вдюв гарантує значно краще поперечне розтікання газу, завдяки чому досягається вища середня по всій площі пластини ефективність плівкового охолодження.

Таким чином, зміна напрямку подачі охолоджувача суттєво впливає на якість формування теплового захисту. Незважаючи на локальне зниження усереднених по ширині показників, застосування різнонапрявленої схеми є більш доцільним та надійним, оскільки вона генерує рівномірнішу захисну плівку і забезпечує краще загальне охолодження робочої поверхні без глибоких температурних провалів.

Перелік використаних джерел

1. Bunker R. S. Evolution of turbine cooling. — American Society of Mechanical Engineers, 2017. — 5 p. — URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/fd050617-1e0a-40d9-9e2f-84669adf94e2/download>.
2. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches / Y. Lu, R. S. Bunker, S. V. Ekkad, A. Dhungel // Journal of Turbomachinery. — 2009. — P. 13. — DOI: 10.1115/1.2950057.

3. Халатов А. А., Коваленко Г. Г., Мулярчук М. А. Особливості обтікання та тепловіддачі однорядного пучка циліндрів зі спіральними канавками при взаємодії з поперечним потоком повітря // Теплофізика та теплоенергетика. — 2019. — Т. 41, № 2. — URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=PTT_2019_41_2_3.
4. Орел М. О. Дослідження методів удосконалення конвективно-плівкового охолодження лопатки соплового апарату високотемпературній турбіні високого тиску двоконтурного ГТД для дальномістрального літака : Магістерська дисертація / Орел М. О. — Національний авіаційний інститут, 2019. — Аерокосмічний факультет, Кафедра авіаційних двигунів.
5. Компьютерное моделирование пленочного охлаждения при подаче охладителя через отверстия в траншее / А. А. Халатов [и др.] // Инженерно-физический журнал. — 2017. — Т. 90, № 3. — URL: https://www.itmo.by/publications/jept/bibl/?ELEMENT_ID=2014.