

# ЧУТЛИВІСТЬ СІТКИ ПРИ КОМП'ЮТЕРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ПЛАСКІЙ ПОВЕРХНІ З ДВОРЯДНОЮ СИСТЕМОЮ ТРАНШЕЙ

В. В. Южда<sup>1,а</sup>, Т. В. Доник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

## Анотація

У статті досліджується вплив просторової дискретизації на достовірність CFD-розрахунків плівкового охолодження. Об'єктом дослідження виступає плівкове охолодження плоскої поверхні дворядної системи траншей. Для підтвердження коректності моделі виконано валідацію шляхом порівняння інтегральних і локальних характеристик охолодження на трьох розрахункових сітках. Проведений аналіз дозволив визначити сітку, яка забезпечує необхідний баланс між точністю отриманих результатів та обсягом витрачених обчислювальних ресурсів.

**Ключові слова:** плівкове охолодження, газова турбіна, траншейна геометрія, ефективність охолодження, валідація.

## Вступ

Енергетичний сектор традиційно залишається фундаментом для розвитку всіх галузей промисловості, що робить його стратегічним напрямком світової науки. Якщо протягом XX століття головним рушієм прогресу було створення концептуально нових механізмів, то сьогоднішня дослідницька парадигма зазнала змін. Наразі зусилля інженерів спрямовані на глибоку модернізацію та оптимізацію вже наявного обладнання для досягнення максимальних показників продуктивності, економічності та надійності. Ключовим об'єктом таких удосконалень виступають газові турбіни — універсальні силові установки, які формують основу сучасної військової та цивільної авіації, суднобудівної галузі, а також є базовим елементом компресорних станцій на магістральних газопроводах.

Безпосереднім шляхом збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) турбіни є підвищення температури газів на вході. Оскільки ці значення суттєво перевищують гранично допустимі температури експлуатації жароміцних сплавів (близько 1000 — 1300°C), критичної ваги набуває впровадження ефективного плівкового охолодження робочих поверхонь [1]. З метою економії фінансових та часових ресурсів, дослідження та оптимізація таких систем сьогодні реалізується переважно методами обчислювальної гідродинаміки. Оцінка надійності утвореного теплового захисту базується на показнику адіабатичної ефективності плівкового охолодження [3], що розра-

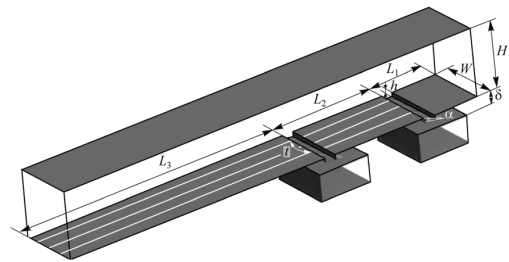


Рис. 1. Геометрична модель дворядної системи траншей[2]

ховується за формулою:

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

де  $T_{\infty}^*$  — позначає повну температуру незбуреного гарячого газу,  $T_2^*$  — повну температуру інжектowanego холодоагенту, а  $T_{aw}$  — температуру адіабатичної стінки.

Інтенсивність подачі охолоджувача, яка безпосередньо впливає на структуру течії, прийнято описувати безрозмірним параметром вдуву. Він відображає співвідношення масових витрат струменя холодоагенту та основного набігаючого потоку:

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

де  $\rho_2$  та  $\rho_{\infty}$  — густина охолоджувального та основного середовища відповідно, а  $w_2$  та  $w_{\infty}$  — їхні локальні швидкості [4, 5].

<sup>а</sup>valeri27062004@email.com

Метою даної роботи є дослідження сіткової незалежності математичної моделі плівкового охолодження та верифікація трьох розрахункових сіток різної щільності. Зважаючи на необхідність пошуку суворого компромісу між точністю обчислень та витратами апаратних ресурсів, дослідження виконано методом комп'ютерного 3D-моделювання (CFD) у програмному комплексі ANSYS 2023 R1.

## 1. Комп'ютерна модель

Об'єктом чисельного дослідження є геометрична модель дворядної системи плівкового охолодження, розташована в прямокутному каналі висотою  $H = 10$  мм, шириною  $W = 9,6$  мм та загальною довжиною  $L = 64$  мм. На нижній адіабатній стінці виконано дві прямокутні траншеї, рознесені на відстань  $L_2 = 16$  мм. Довжина ділянки перед першою траншеєю становить  $L_1 = 8$  мм, а вихідної ділянки —  $L_3 = 40$  мм, що формує загальну зону охолодження протяжністю 56 мм.

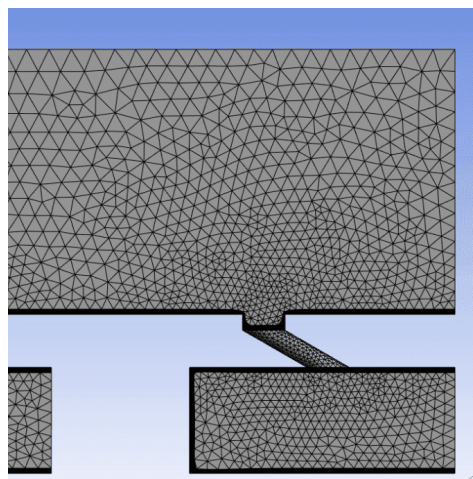
Обидві траншеї мають ідентичний профіль із шириною  $b = 1,6$  мм ( $2d$ ) та глибиною  $h = 0,6$  мм, класифікуючись як «дрібні» траншеї ( $h/d = 0,75$ ). Інжекція холодоагенту реалізується через систему похилих отворів діаметром  $d = 0,8$  мм, розташованих у шаховому порядку: 4 отвори у першій траншеї та 3 отвори у другій. Отвори виконані з поперечним кроком  $t = 2,4$  мм ( $t/d = 3$ ) та нахилені до поверхні під кутом  $\alpha = 30^\circ$ , причому їхні осі орієнтовані різнонаправлено. Для рівномірного формування захисної плівки газ подається з двох окремих ресиверів. Масові витрати через другий ряд задавалися з умови  $G_2 = 0,75 \cdot G_1$ , рис. 1.

Для максимального наближення чисельного експерименту до реальних умов експлуатації енергетичних газотурбінних установок, граничні умови моделі були відповідним чином адаптовані. На вхідній межі основного розрахункового каналу швидкість гарячого газу фіксувалася на рівні 400 м/с, а його температура становила 1100°C. Температура охолоджувального повітря, що подається у дворядну траншею, дорівнювала 500°C. На вихідній межі розрахункової області підтримувався постійний статичний тиск величиною  $10^6$  Па. Варто зазначити, що тиск на вході в систему охолодження не задавався як константа, а визначався автоматично в процесі ітераційного розв'язання задачі для забезпечення цільової інтенсивності інжекції з параметром вдуву  $m = 1$ . Початкова інтенсивність турбулентності набігаючого повітряного потоку складала 1%.

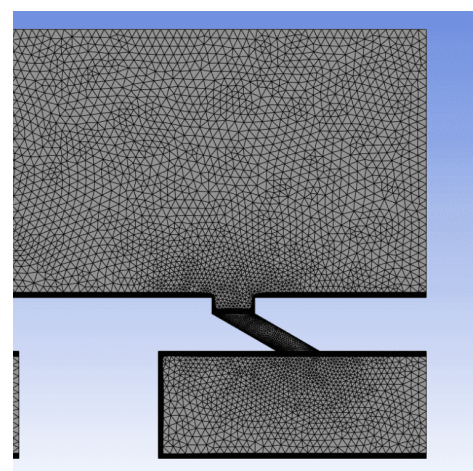
## 2. Просторова дискретизація та верифікація розрахункової моделі

Розрахункова сітка є фундаментальною основою обчислювальної гідродиніміки, оскільки саме вона перетворює безперервне газодинамічне середовище на скінченну дискретну математичну модель.

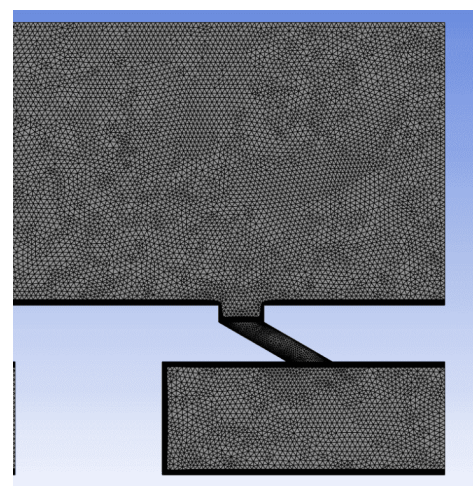
Від розміру, форми та топології комірок критично залежить як точність розв'язання системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, так і загальна



(а) Розрахункова сітка досліджуваної моделі на 1 млн елементів



(б) Розрахункова сітка досліджуваної моделі на 5 млн елементів



(в) Розрахункова сітка досліджуваної моделі на 10 млн елементів

Рис. 2. Розрахункова сітка

стабільність обчислювального процесу. Занадто грубе розбиття простору не здатне зафіксувати різкі температурні градієнти та складну структуру по-

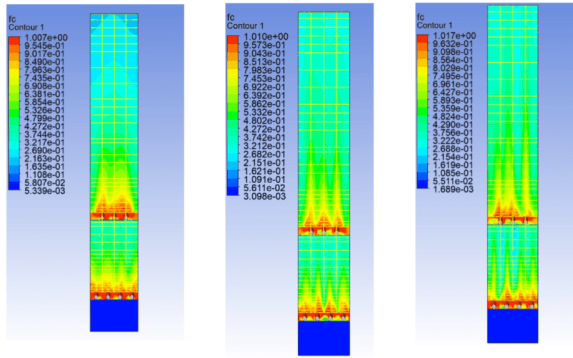


Рис. 3. Поля адіабатної ефективності плівкового охолодження дворядної системи траншей співнапрявленого потоку охолоджувача для трьох сіток різної густини а) — груба сітка на 1 млн елементів; б) — середня сітка на 5 млн елементів; в) — дрібна сітка на 10 млн елементів

граничного шару, що веде до суттєвих похибок і викривлення фізичної картини течії. З іншого боку, надмірно густа сітка експоненціально збільшує час розрахунків і вимоги до апаратного забезпечення. Тому процес просторової дискретизації є надзвичайно відповідальним етапом, що вимагає пошуку суворого компромісу між високою достовірністю результатів та раціональним використанням обчислювальних ресурсів.

У даному дослідженні генерація сітки виконувалася в програмному середовищі ANSYS Mesh. З огляду на наявність складних просторових елементів: отворів подачі холодоагенту та геометрії траншей, то перевагу було віддано неструктурованій сітці з високим ступенем щільності. Базовий об'єм розрахункового домену заповнено тетраедричними елементами. Для забезпечення коректного розв'язання градієнтів швидкості та температури у в'язкому підшарі, тобто поблизу твердих адіабатних стінок, було застосовано метод ручного локального налаштування з використанням функції Inflation, що дозволило згенерувати якісні призматичні шари.

Важливим етапом будь-якого CFD-дослідження є верифікація розрахункової моделі, яка полягає у доведенні сіткової незалежності результатів. З цієї метою для єдиної геометричної моделі було розроблено три ідентичні сітки з різною роздільною здатністю просторової дискретизації: грубу на 1 млн елементів рис. 2(а), середню на 5 млн елементів рис. 2(б) та дрібну на 10 млн елементів рис. 2(в).

Для замикавання системи рівнянь Нав'є-Стокса, у середнених за Рейнольдсом (RANS), у даній роботі було застосовано двопараметричну модель турбулентності Shear Stress Transport (SST). Використання цієї моделі є оптимальним для задач плівкового охолодження, оскільки вона поєднує точність  $k-\omega$  моделі при розв'язанні градієнтів у примежовому шарі поблизу стінки зі стабільністю  $k-\epsilon$  моделі у вільному потоці. Застосування моделі SST забезпечує високу достовірність прогнозування відривних зон та

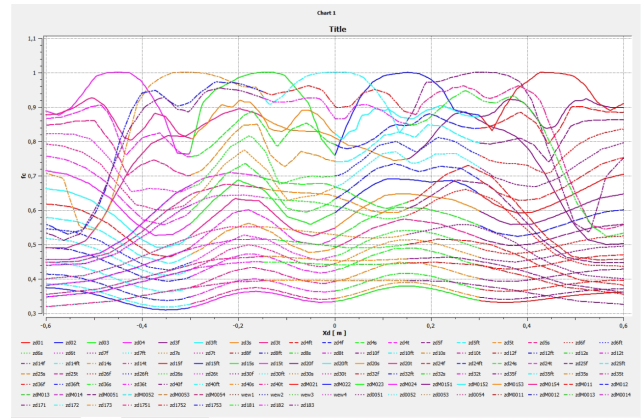


Рис. 4. Локальна ефективність плівкового охолодження співнапрявленого потоку охолоджувача для плоскої поверхні дворядної системи траншей з густиною сітки 1 млн елементів

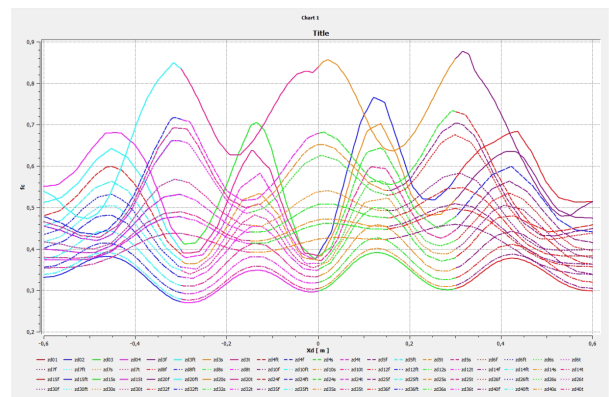


Рис. 5. Локальна ефективність плівкового охолодження співнапрявленого потоку охолоджувача для плоскої поверхні дворядної системи траншей з густиною сітки 5 млн елементів

локальних характеристик теплообміну при взаємодії інжектowanego холодоагенту з основним гарячим газом.

### 3. Результати моделювання та їх аналіз

Було проведено серію ідентичних розрахунків за однакових граничних умов на трьох неструктурованих сітках різної густини: грубій на 1 млн елементів, середній на 5 млн елементів та дрібній на 10 млн елементів. Метою даного етапу було порівняння ключових газодинамічних характеристик для визначення межі, за якою подальше подрібнення розрахункових комірок стає недоцільним.

На рис. 3 представлено поля адіабатної ефективності плівкового охолодження дворядної системи траншей співнапрявленого потоку охолоджувача для трьох сіток різної густини: а) — груба сітка на 1 млн елементів; б) — середня сітка на 5 млн елементів; в) — дрібна сітка на 10 млн елементів. Візуальне зіставлення цих температурних контурів наочно підтверджує загальну тенденцію до стабілізації розрахункових даних при збільшенні густини сітки.

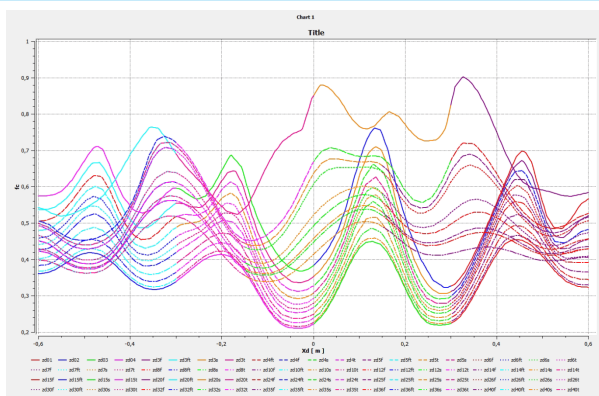


Рис. 6. Локальна ефективність плівкового охолодження співнапрявленого потоку охолоджувача для плоскої поверхні дворядної системи траншей з густиною сітки 10 млн елементів

На рис. 4, 5 та 6 представлено розподіл локальної ефективності плівкового охолодження в поперечних перерізах для сіток на 1, 5 та 10 мільйонів елементів відповідно. Візуальний та кількісний аналіз цих графіків демонструє вплив просторової дискретизації на роздільну здатність розрахунку. Результати, отримані на грубій сітці (рис. 4), характеризуються значним розсіюванням профілів та недостатньо точним відтворенням градієнтів поблизу стінки через високу чисельну дифузію. При переході до сітки на 5 мільйонів елементів (рис. 5) спостерігається стабілізація локальних максимумів та мінімумів, структура течії набуває чітко вираженого фізичного характеру. Подальше подрібнення сітки до 10 мільйонів елементів (рис. 6) не вносить принципових змін у топологію розподілу охолоджувача, а профілі локальної ефективності візуально збігаються з результатами середньої сітки.

Найбільш показовим критерієм для оцінки похибки дискретизації є порівняння середньої по ширині ефективності плівкового охолодження  $\eta$  вздовж відносної поздовжньої координати  $x/d$ . Відповідні криві для всіх трьох досліджуваних сіток наведено на рис. 7. Як видно з графіка, крива, що відповідає сітці на 1 мільйон елементів суттєво відхиляється від інших результатів. Особливо критична розбіжність спостерігається на ділянці після другої траншей при  $x/d > 30$ , де груба сітка прогнозує стрімке та нефізичне падіння ефективності теплового захисту. Це пояснюється тим, що великий розмір комірок не дозволяє коректно розв'язати турбулентне перемішування у в'язкому підшарі, що призводить до швидкого «розмиття» захисної плівки в розрахунках. Натомість, криві для сіток на 5 мільйонів та 10 мільйонів елементів демонструють високий ступінь збіжності на всій довжині розрахункової області. Різниця між цими двома конфігураціями є мінімальною і знаходиться в межах допустимої інженерної похибки (менше 1–2 %).

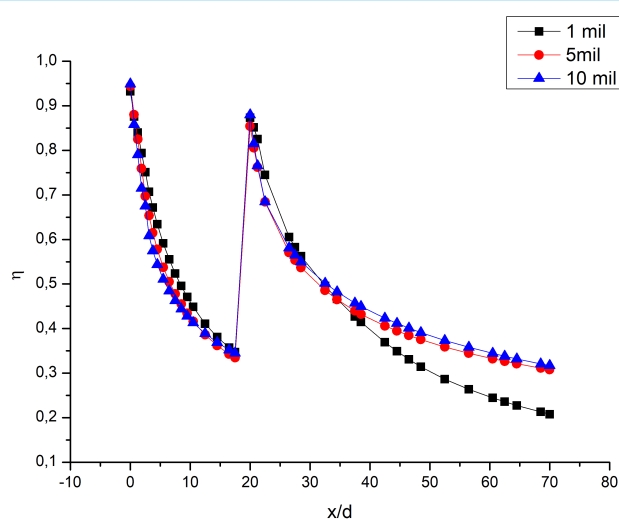


Рис. 7. Середня по ширині ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні дворядної системи траншей

## Висновки

Досліджено вплив просторової дискретизації на точність чисельного моделювання ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні з дворядною системою траншей. Для розрахункової моделі це становить практичний інтерес для забезпечення достовірності результатів дослідження систем теплового захисту газових турбін, адже вибір оптимальної густини сітки дозволяє мінімізувати похибку обчислень без надмірного перевантаження обчислювальних ресурсів.

В результаті аналізу локальної та середньої по ширині ефективності на трьох розрахункових сітках виявлено чітку закономірність стабілізації розв'язку: груба сітка на 1 млн елементів дає значне відхилення результатів та нефізичне падіння ефективності, в той час як профілі для сіток на 5 та 10 мільйонів елементів практично збігаються, демонструючи відмінність у межах допустимої похибки.

Таким чином, подрібнення розрахункової області суттєво впливає на точність результатів лише до певної межі: оскільки при досягненні 5 мільйонів елементів ключові газодинамічні параметри стабілізуються, подальше подрібнення до 10 мільйонів стає недоцільним. Використання сітки на 5 мільйонів елементів є найбільш раціональним, оскільки вона забезпечує необхідну точність моделювання теплового захисту при оптимальних витратах часу.

## 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. Пленочное охлаждение за двумя рядами траншей на плоской поверхности / А. А. Халатов, Ё. Щиджу, Д. Ван, Т. В. Доник // Теплофизика и аэромеханика. — 2020. — Т. 27, № 4. — URL: <https://>

- [//www.sibran.ru/upload/iblock/1c1/1c189e1e785940d790eb68e8066f06a0.pdf](http://www.sibran.ru/upload/iblock/1c1/1c189e1e785940d790eb68e8066f06a0.pdf).
3. 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](https://doi.org/10.1115/1.2950057).
4. 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](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).
5. Орел М. О. Дослідження методів удосконалення конвективно-плівкового охолодження лопатки соплового апарату високотемпературній турбіні високого тиску двоконтурного ГТД для дальномаягістрального літака : Магістерська дисертація / Орел М. О. — Національний авіаційний інститут, 2019. — Аерокосмічний факультет, Кафедра авіаційних двигунів.