

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-31>

УДК 004.94:536.2:519.6

СВИНЧУК Ольга

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-9032-6335>

7011990@ukr.net

КЛИМЕНКО Ярослав

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

yaroslav.klymenko98@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ В ПЛОСКООВАЛЬНІЙ ТРУБІ ЗА ДОПОМОГОЮ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

У статті представлено комплексне дослідження процесів теплообміну та гідродинаміки в трубі плоскоовального профілю з використанням сучасних чисельних методів та лабораторних випробувань. Дослідження ґрунтується на експериментальних даних, отриманих на спеціально створеному стенді з електричним нагрівачем, що забезпечує стабільні граничні умови за постійного теплового потоку. Проведено моделювання процесів за допомогою програмного забезпечення SolidWorks Flow Simulation, що дозволило виявити особливості течії та теплообміну в нестандартному профілі труби.

Особливу увагу приділено аналізу відхилень результатів чисельного моделювання від лабораторних експериментів. Встановлено, що незважаючи на досить високу узгодженість, спостерігається помітна чутливість результатів до обраних налаштувань розрахункових моделей, зокрема параметрів турбулентності та якості побудови чисельної сітки. Наведено рекомендації щодо покращення точності моделювання, що можуть бути застосовані у майбутніх дослідженнях і при проектуванні теплоенергетичного обладнання.

Окрім технічних аспектів, стаття порушує фундаментальні питання щодо взаємозв'язку експериментальних і чисельних методів у сучасній науці, їхнього впливу на розвиток інженерної думки та можливостей оптимізації процесів проектування й аналізу складних теплоенергетичних систем. Результати дослідження можуть бути корисними як для подальших наукових розробок у сфері теплоенергетики, так і для підвищення ефективності роботи промислових теплообмінних установок.

Ключові слова: програмне забезпечення, програмний комплекс, теплообмін, гідродинаміка, плоскоовальна труба, математична модель, чисельне моделювання, SolidWorks Flow Simulation, експериментальні дослідження.

SVYNCHUK Olha, KLYMENKO Yaroslav

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

MODELING OF HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A FLAT OVAL PIPE USING SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

The paper presents a comprehensive study of heat transfer and hydrodynamic processes in a flat-oval profile pipe using advanced numerical methods and laboratory tests. The research is based on experimental data obtained from a specially designed experimental stand equipped with an electric heater providing stable boundary conditions under constant heat flux. Modeling of the processes was conducted using SolidWorks Flow Simulation software, allowing for the detailed analysis of flow characteristics and heat transfer phenomena inherent to non-standard pipe profiles.

Special attention is given to analyzing the deviations between numerical simulation results and laboratory experiments. It was found that, despite relatively good agreement, there is notable sensitivity of the results to selected numerical model settings, particularly turbulence parameters and mesh quality. Recommendations are provided for improving modeling accuracy, which can be applied in future research and in the design of heat power equipment.

Beyond the technical details, this article also explores fundamental issues concerning the interaction and synergy between experimental and numerical methods in contemporary science, their influence on the development of engineering thought, and their potential to optimize the design and analysis of complex heat-power systems. The findings of this study can be beneficial for further scientific developments in thermal energy engineering, as well as for enhancing the efficiency of industrial heat-exchange equipment.

Keywords: software, software package, heat transfer, hydrodynamics, flat-oval pipe, mathematical model, numerical simulation, SolidWorks Flow Simulation, experimental research.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Енергоефективність теплотехнічного обладнання сьогодні визначає не лише собівартість продукції, а й спроможність держав і компаній дотримуватися міжнародних екологічних зобов'язань [1-4]. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, близько 30 % світового споживання енергії припадає на системи, у яких головну роль відіграють теплообмінники. Одним зі шляхів підвищення їхньої ефективності є застосування труб нестандартних профілів, насамперед плоскоовальних. Завдяки зменшенню еквівалентного

гідродіаметра та збільшенню питомої площі змочування плоскоовальна труба забезпечує приріст інтенсивності теплопередачі на 10-20 % відносно гладкої круглої при близькому периметрі, проте водночас спричиняє зростання аеродинамічного опору на 40-70 %. Вибір оптимальної форми профілю потребує точних теплогідрравлічних характеристик у реальних діапазонах чисел Рейнольдса.

Отримати такі дані виключно лабораторним шляхом дорого й трудомістко. Повнофункціональний стенд повинен забезпечити рівномірний тепловий потік $q = \text{const}$, вимірювати падіння тиску на короткій ділянці, фіксувати десятки температурних і швидкісних точок та підтримувати низький рівень турбулентності вхідного потоку. Вартість одного лише виготовлення зразків і калібрування вимірювальних контурів може сягати невинуватених трат коштів і часу, а будь-яка зміна геометрії вимагає повторення циклу.

У цьому контексті дедалі більше уваги привертають комерційні CFD-комплекси (SolidWorks Flow Simulation, Ansys Fluent, тощо), які дозволяють отримати детальні карти швидкостей, температур і тисків за лічені години машинного часу. Ліцензії програмного забезпечення й робота інженера коштують у рази менше, ніж повномасштабні експерименти. Проте точність таких розрахунків критично залежить від:

- вибору турбулентної моделі;
- якості та локального згущення розрахункової сітки;
- правильного задання граничних умов і реальної шорсткості стінок.

Без ретельної валідації чисельної моделі на експериментальних даних отримані CFD-результати можуть містити похибку 20-30 %, що нівелює економію.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Плоскоовальні канали давно розглядаються як один із перспективних способів пасивної інтенсифікації теплообміну. Систематичні лабораторні роботи, виконані останніми роками, підтвердили, що за однакового периметра перерізу плоскоовальні труби демонструють приріст числа Нуссельта на 10-20 % порівняно з круглими, а приріст коефіцієнта аеродинамічного опору зазвичай не перевищує 70 % [5]. Розширені дослідження частково оребренних плоскоовальних труб показали, що локальні пір'яні ребра дають додаткові 7-9 % приросту тепловіддачі без істотного збільшення втрат тиску [6].

Низка авторів запропонувала емпіричні кореляції $Nu = f(Re, Pr, \varepsilon)$ для плоских, еліптичних і плоскоовальних профілів у діапазоні $Re \approx 2 \times 10^3 - 8 \times 10^4$ [7-9]. Попри це, у відкритій літературі й досі бракує даних, що охоплювали б одночасно широкі теплові режими $q = \text{const}$, детальні карти локальних температур стінки та комплексний вимір падіння тиску. Такий дефіцит експериментальних відомостей суттєво ускладнює валідне проектування промислових теплообмінників на базі плоскоовальних труб.

Комерційні пакети CFD (Ansys Fluent, STAR-CCM+, SolidWorks Flow Simulation) пропонують інженерам швидкий спосіб оцінити теплогідрравлічні характеристики складних каналів. Проте більшість опублікованих робіт стосуються круглих або еліптичних труб; для плоскоовального профілю кількість верифікованих розрахунків обмежена [10-12]. Наприклад, SolidWorks Flow Simulation зазвичай валідують на аеродинамічних або зовнішніх теплообмінних тестах [13], а не на внутрішньому обтіканні каналів малої товщини.

Крім того, автори, що досліджували нетипові канали (спіральні звивисті, хвилясті тощо), відмічають сильну чутливість результатів до вибору турбулентної моделі та локального згущення сітки у зонах з крутим градієнтом швидкості [14]. Це ставить під сумнів можливість прямого застосування «типових» налаштувань SolidWorks Flow Simulation [10] до плоскоовальних труб без попередньої експериментальної калібровки.

Аналіз опрацьованих джерел дає змогу виокремити такі проблемні аспекти:

- брак узагальнених верифікаційних баз для каналів плоскоовального профілю: доступні експериментальні дані фрагментарні й часто отримані за різних умов теплообміну ($q = \text{const}$, $T = \text{const}$, змішані режими) [10,12];
- відсутність систематичного порівняння SolidWorks Flow Simulation з лабораторними вимірюваннями саме для плоскоовальних труб, тоді як для круглих дані узгоджені значно краще.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є оцінка ефективності чисельного моделювання процесів теплообміну й гідродинаміки в плоскоовальній трубі із використанням програмного забезпечення SolidWorks Flow Simulation, що дозволить зменшити обсяг фізичних експериментів при проектуванні теплоенергетичного обладнання. Такий підхід обґрунтовує практичну доцільність переходу від переважно експериментальної парадигми до цифрового інжинірингу в розробці теплообмінників із плоскоовальними каналами.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- отримати репрезентативний масив експериментальних даних ($q = \text{const}$, $Re \approx 10^4 - 6 \times 10^4$) щодо числа Нуссельта та коефіцієнтів аеродинамічного опору для подальшої валідації CFD-моделі;
- розробити CFD-модель у програмному забезпеченні SolidWorks Flow Simulation, яка адекватно відтворюватиме геометричні параметри та граничні умови лабораторного стенду;

- виконати кількісне порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними, використовуючи RMS-похибку та максимальне відхилення ($\max \Delta \leq 5\%$) як критерії прийнятності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Експерименти проводилися у відкритому аеродинамічному каналі, що складався з чотирьох функціонально відокремлених частин (рис. 1).

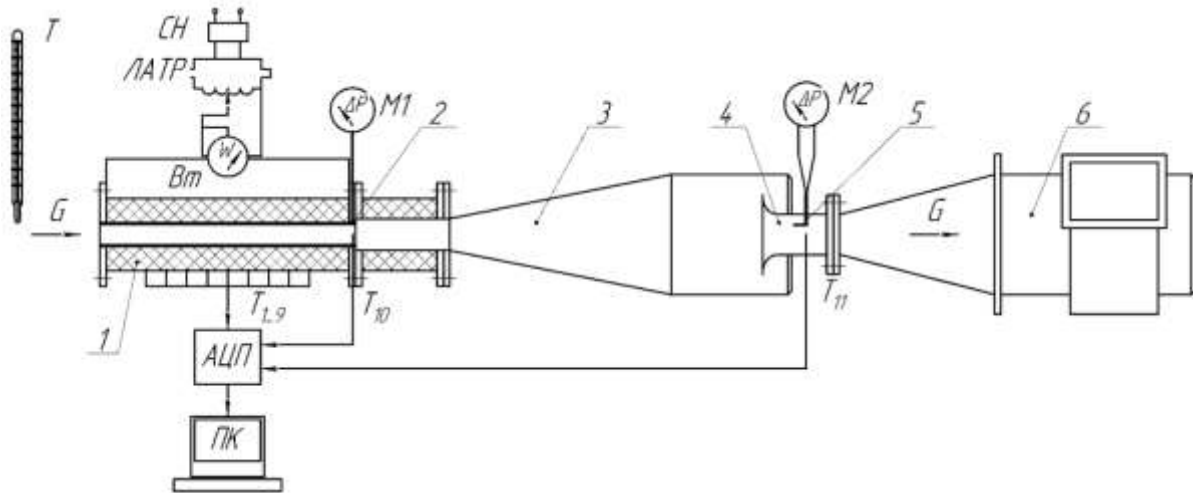


Рис. 1. Експериментальний стенд [6]:

1 – робоча ділянка; 2 – штуцер відбору статичного тиску; 3 – дифузор; 4 – сопло; 5 – трубка Піто; 6 – вентилятор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; М1, М2 – мікроманометри; ПК – персональний комп'ютер; Т – термометр; Вт – ватметр; ЛАТР – лабораторний автотрансформатор; СН – стабілізатор напруги

1. Всмоктувальна секція. Повітря із приміщення потрапляє у плавний дифузор, а далі – у сопло еталонного витратоміра (діаметр 36 мм, профіль за лемніскатаю). Така комбінація формує рівномірний потік із турбулентністю не більше 0,3 %.

2. Робоча ділянка. Безпосередньо за соплом розташовано плоскоовальну сталеву трубу 30×15 мм, $L=320$ мм, $\delta=2$ мм. Бічні краї плавно підведені через фланці до круглих перехідників, аби мінімізувати паразитний відрив.

3. Нагрівальна система. Уздовж зовнішньої поверхні труби щільно намотано ніхромовий дріт діаметром 0,6 мм з кроком 0,65 мм. Нагрівник під'єднано до ЛАТР-а, а електрична потужність (50–150 Вт) контролюється ватметром класу 0,5. Низька теплопровідність повітря і теплоізоляція зовні гарантують граничну умову $q=\text{const}$ на металевій стінці.

4. Відсмоктувальна секція. Після дослідної ділянки повітря мінає 200-мм вставку, трубку Піто (для динамічного тиску) і надходить до відцентрового вентилятора. Перероблений струмінь відводять на відстань понад 3 м, щоби виключити рециркуляцію гарячого повітря на вхід.

Для реєстрації параметрів теплообміну використовувалась вимірювальна система, до складу якої входили одинадцять мідь-константанових термопар діаметром 0,2 мм у жолобках стінки з кроком 30 мм для вимірювання температури металу. Додатково дві термопари фіксували температуру повітря на вході та виході з трубопроводу. Контроль тиску здійснювався за допомогою двоканального мікроманометр ММН-240(5)-1,0, підключеного до трубки Піто та відбірних штуцерів для статичного тиску. Сигнали всіх сенсорів оцифровуються аналогово-цифровим перетворювачем з розрядністю 16 біт і записувалися з частотою 1 Гц, при цьому усереднення за інтервал 120 с дозволяло зменшити випадкову похибку до $\pm 0,2$ К для температури та $\pm 1,5$ Па для тиску.

У кожному режимі дослідження систему попередньо прогрівали щонайменше протягом 20 хв до стабілізації теплового стану, що відповідало зменшенню градієнта температури стінки до значення менше ніж 0,1 К/хв. Після досягнення термічної стабільності проводили 3–5 незалежних серій вимірювань для забезпечення статистичної достовірності отриманих даних.

У процесі лабораторного експерименту для гладкої плоскоовальної труби з розмірами $30 \times 15 \times 2$ мм та довжиною 320 мм було отримано просторові розподіли температури стінки та повітряного потоку, а також значення аеродинамічного тиску (рис. 2). Дослідження проводилося в режимі сталого теплового потоку ($q = \text{const}$), при цьому число Рейнольдса змінювалося в діапазоні від 12000 до 54000, що відповідає характерній області турбулентного режиму роботи для теплообмінників.

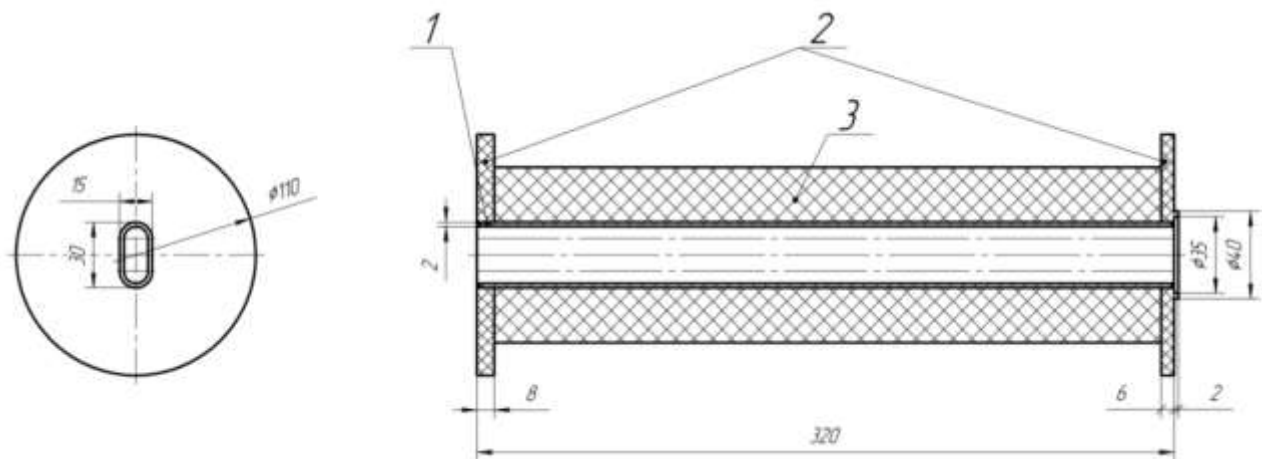


Рис. 2. Робоча ділянка плоскої труби [6]:
1 – труба; 2 – фланець; 3 – теплоізоляція

За результатами експерименту встановлено основні закономірності теплогідравлічної поведінки повітряного потоку в плоскоовальній трубі:

- число Нуссельта (Nu) демонструвало зростання зі збільшенням числа Рейнольдса (Re) згідно степеневі апроксимації:

$$Nu = 0,102 \cdot Re^{0,7058},$$

- у межах досліджуваного діапазону Re значення Nu змінювалися від 48 до 142, що відповідає типовому тренду турбулентного теплообміну;

- коефіцієнт аеродинамічного опору ζ змінювався в межах від 0,038 до 0,050 для відповідного діапазону числа Рейнольдса 12000-54000, що узгоджується з відомими літературними залежностями для гладких труб [7];

- падіння тиску та розподіл температури стінки вздовж труби залишилися рівномірними у центральній зоні, що свідчить про стабільність теплового режиму та коректність організації експерименту;

- похибка вимірювань по параметрах Nu та ζ не перевищувала 5 %, а відхилення між серіями дослідів при однакових умовах не перевищували 3 %.

Для проведення чисельного моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки в плоскоовальній трубі було обрано програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation. Весь процес моделювання складався з кількох етапів.

Першим етапом стало створення геометричної моделі, яка відтворює дослідний зразок із максимальною точністю. Було побудовано тривимірну CAD-модель труби плоскоовального перерізу з розмірами 30×15 мм, довжиною 320 мм і товщиною стінки 2 мм (рис. 3).

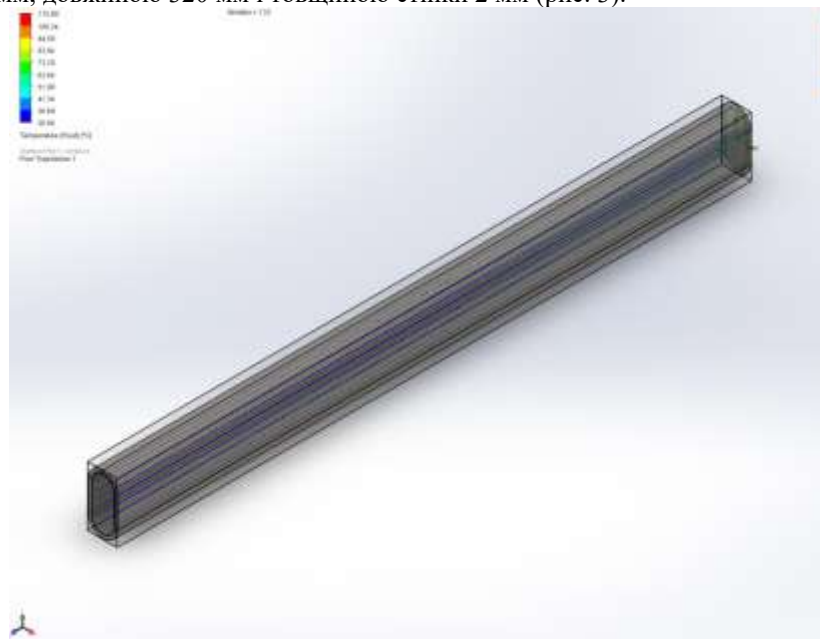


Рис. 3. Модель плоскоовальної труби

Геометрія моделі повністю відповідала конфігурації експериментального стенду, що забезпечує коректність граничних умов та достовірність подальших розрахунків (рис. 4).

На другому етапі було виконано налаштування нового проекту SolidWorks Flow Simulation з наступними параметрами:

- тип аналізу – Internal (внутрішній потік);
- робоче середовище (Fluid) – повітря;
- увімкнено режим теплопровідності у твердих тілах (Heat conduction in solids);
- тип течії – турбулентна із використанням стандартної k-ε моделі турбулентності;
- початкові умови – атмосферний тиск 101325 Па, температура на вході 20°C.

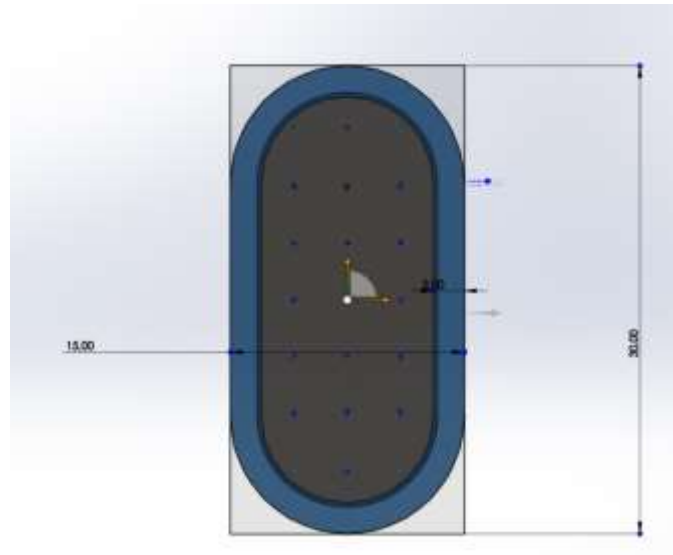


Рис. 4. Геометрія моделі

На третьому етапі було визначено граничні умови (Boundary Conditions) для чисельного моделювання потоку та теплообміну в трубі.

На вході (Inlet) було задано швидкість потоку W_{in} з температурою $T_{in} = 20^\circ\text{C}$:

- перша конфігурація: $W = 11,67$ м/м;
- друга конфігурація: $W = 29$ м/с;
- третя конфігурація: $W = 50,6$ м/с.

Інтенсивність турбулентності на вході встановлено на рівні 5 %.

На виході (Outlet) встановлено атмосферний тиск 101325 Па з температурою 20°C.

На зовнішній поверхні труби задано тепловий потік (Heat Flux), який розраховувався за формулою (1):

$$q = \frac{Q}{A}, \quad (1)$$

де

q – тепловий потік, Вт/м²;

Q – загальна теплова потужність, Вт;

A – площа зовнішньої поверхні труби м².

Для розрахунку теплового потоку використовували три конфігурації потужності Q :

- перша $Q=66,3$ Вт;
- друга $Q=132,3$ Вт;
- третя $Q=198,9$ Вт.

На четвертому етапі було побудовано високоякісну розрахункову сітку (Mesh) з урахуванням особливостей теплообміну й течії поблизу стінок (рис. 5). Основну увагу зосереджено на локальному згущенні елементів у приповерхневих зонах, де формуються значні градієнти температури та швидкості. Для цього використано інструмент Local Mesh Refinement, що дозволив підвищити точність обчислення локального числа Нуссельта та коефіцієнта аеродинамічного опору. Загальна кількість комірок у сітці становила близько 500 000, що забезпечило належну деталізацію й стабільність чисельного розв'язання.

У результаті чисельного моделювання були отримані детальні розподіли температури, швидкості та тиску в об'ємі плоскоовальної труби. Для оцінки достовірності результатів чисельного аналізу було проведено їх порівняння з експериментальними даними за ключовими критеріями – числом Нуссельта та коефіцієнтом аеродинамічного опору.

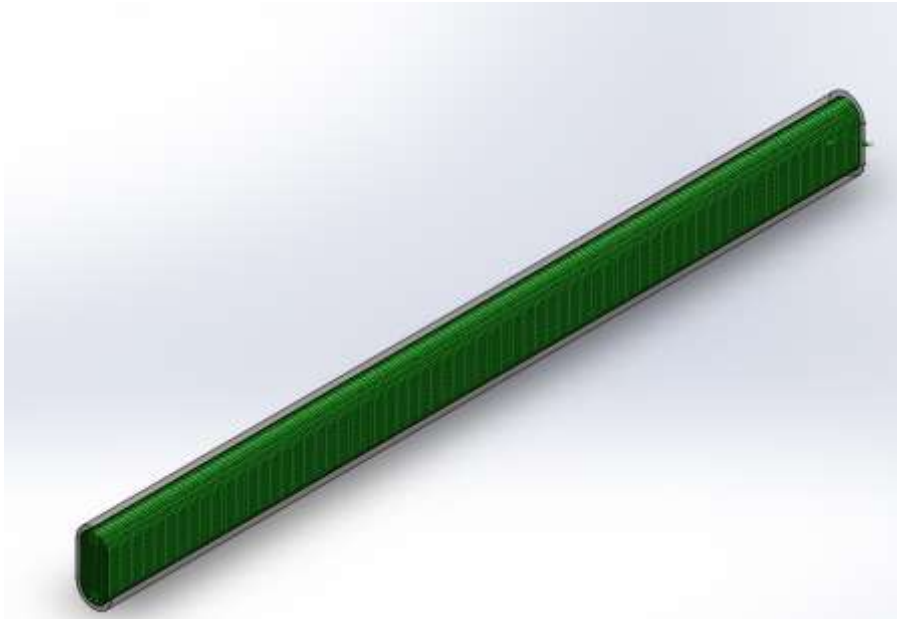


Рис. 5. Згенерована розрахункова сітка

Число Нуссельта обчислюється за формулою (2):

$$Nu = \frac{a \times d_{eq}}{\lambda}, \quad (2)$$

де

a – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²К, отриманий з CFD-моделювання;

d_{eq} – еквівалентний діаметр труби (м);

λ – теплопровідність повітря, що залежить від середньої температури потоку;

$$d_{eq} = \frac{4 A_{cs}}{P_{wet}}, \quad (3)$$

де

A_{cs} – площа поперечного перерізу труби,

P_{wet} – довжина контуру, що контактує з теплоносієм.

Коефіцієнт аеродинамічного опору ξ :

$$\xi = \frac{2 \Delta p d_{eq}}{p W^2 L}. \quad (4)$$

На основі чисельного моделювання отримано результати, які було зіставлено з експериментальними даними з метою верифікації моделі. Результати порівняння представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз параметрів Nu та ξ за CFD-розрахунком і експериментом

Число Re	Nu (експеримент)	Nu (CFD)	ΔNu , %	ξ (експеримент)	ξ (CFD)	$\Delta \xi$, %
12000	52,1	59,2	+13,6%	0,048	0,042	-12,5%
30000	89,4	96,7	+8,2%	0,038	0,035	-7,9%
48000	142,1	154,6	+8,8%	0,032	0,030	-6,3%

Як видно з таблиці 1, результати чисельного моделювання загалом добре корелюють із експериментальними значеннями як для числа Нуссельта, так і для коефіцієнта аеродинамічного опору. Незважаючи на наявні відхилення, переважно в межах 10–14 %, CFD-модель демонструє прийнятний рівень точності для попереднього інженерного аналізу. Для візуального підтвердження виявлених закономірностей та кращого розуміння динаміки зміни параметрів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса наведено відповідні графічні залежності (рис. 6 і рис. 7).

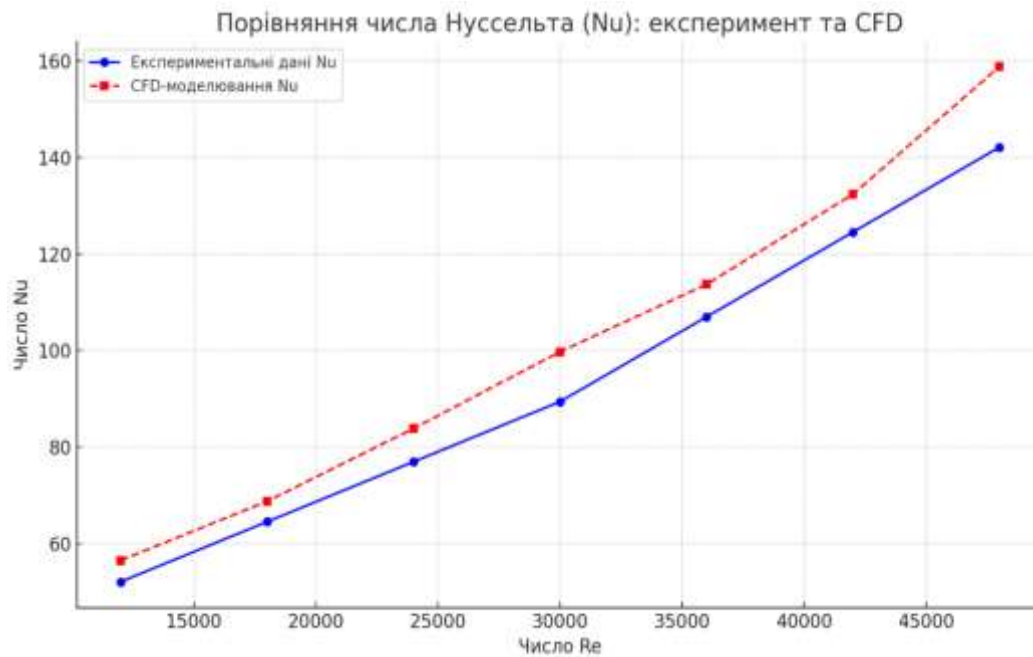


Рис. 6. Порівняльні графіки числа Нуссельта експерименту та моделювання

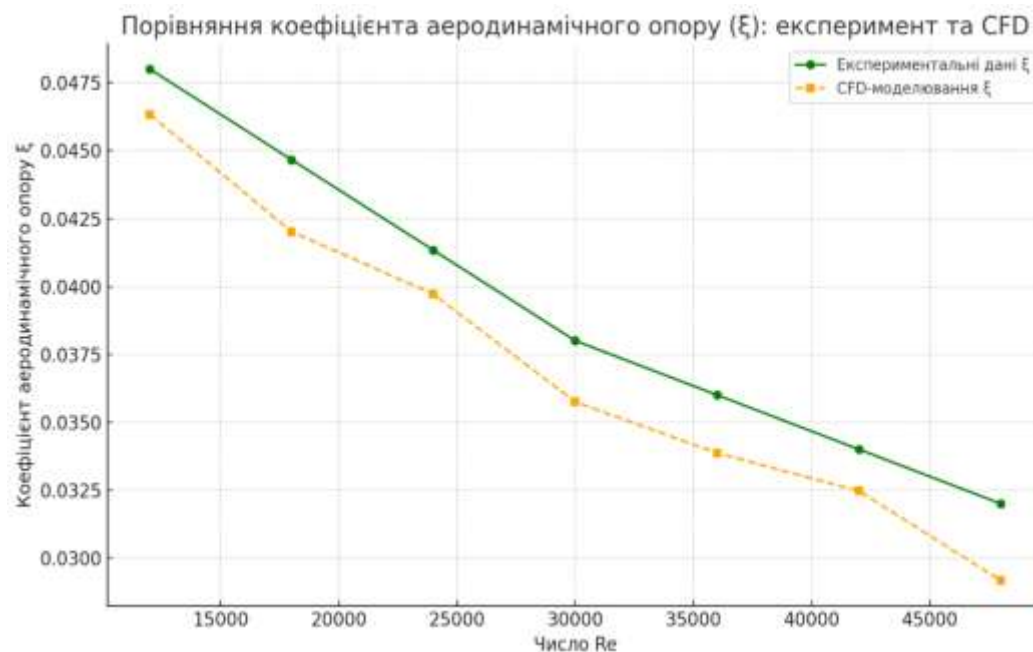


Рис. 7. Порівняльні графіки коефіцієнту аеродинамічного опору експерименту та моделювання

Під час чисельного моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки у плоскоовальних трубах із використанням програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation спостерігаються певні відхилення результатів порівняно з експериментальними даними. Основні причини цих відхилень можна класифікувати за кількома ключовими категоріями.

1. *Ідеалізація геометричної моделі.* У чисельних розрахунках використовується геометрія, яка є ідеальною (гладкі стінки, точні розміри, відсутність шорсткості, прямолінійність труб). Натомість, реальні експериментальні стенди завжди мають певні недоліки: нерівномірність товщини стінок труби та мікрощорсткість внутрішніх поверхонь, що впливає на аеродинамічний опір та теплообмін. Шляхи мінімізації відхилень:

- застосування реалістичної геометрії з урахуванням шорсткості стінок і конструктивних особливостей;
- використання більш високоточних 3D-сканів реальних експериментальних зразків для створення геометричної моделі.

2. *Вибір моделі турбулентності.* У більшості CFD-комплексів, включаючи SolidWorks Flow Simulation, за замовчуванням застосовується стандартна $k-\epsilon$ модель турбулентності, яка хоч і є універсальною, але не завжди точно відтворює складні вихрові та турбулентні процеси у приконтактних шарах. Шляхи мінімізації відхилень:

- використання більш точних турбулентних моделей, таких, як SST $k-\omega$, Realizable $k-\epsilon$ або LES;
- проведення попередньої валідації різних турбулентних моделей для вибору найбільш адекватної для конкретного типу задачі.

3. *Якість та деталізація розрахункової сітки.* Точність результатів CFD-розрахунку значною мірою залежить від якості побудови чисельної сітки. Недостатня деталізація, особливо у приконтактних областях з високими градієнтами температури та швидкості, може спричинити суттєві похибки. Шляхи мінімізації відхилень:

- застосування адаптивної сітки, що автоматично уточнюється в зонах із високими градієнтами параметрів;
- проведення попереднього аналізу сіткової збіжності (mesh independence study), що дозволить підібрати оптимальну густину комірок, яка забезпечує точні результати без зайвого збільшення часу розрахунків.

4. *Точність граничних умов.* Граничні умови – температури, швидкості, теплового навантаження – мають прямий вплив на достовірність CFD-розрахунків. У реальних експериментальних умовах ці параметри можуть змінюватися у часі характеризуватися просторовою неоднорідністю. Шляхи мінімізації відхилень:

- проведення більш точних вимірювань експериментальних параметрів з використанням сучасних високоточних датчиків;
- застосування не постійних (transient), а часово-залежних граничних умов для більш точного відтворення реального експерименту.

5. *Фізичні властивості робочого середовища та матеріалу.* У більшості програмних пакетів фізичні характеристики робочого середовища (повітря) та матеріалу труб (сталь) беруться з довідкових бібліотек, які не завжди точно відображають умови конкретного експерименту. Це може спричинити відхилення в результатах розрахунків. Шляхи мінімізації відхилень:

- використання експериментально визначених фізичних властивостей повітря з урахуванням температурної залежності густини, в'язкості та теплопровідності;
- урахування температурної залежності теплофізичних властивостей матеріалів матеріалу труб у процесі моделювання.

6. *Чисельні похибки програмного забезпечення.* Будь-який CFD-програмний комплекс, включаючи SolidWorks Flow Simulation, має певні вбудовані чисельні методи, які можуть спричиняти додаткові похибки внаслідок округлення, апроксимації та спрощень у розрахункових алгоритмах. Шляхи мінімізації відхилень:

- використання більш точних чисельних налаштувань, зокрема збільшення кількості ітерацій, уточнення критеріїв збіжності;
- застосування кількох незалежних програмних продуктів для перехресної валідації результатів моделювання.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Чисельне моделювання, реалізоване в програмному комплексі SolidWorks Flow Simulation, дозволило адекватно відтворити основні фізичні процеси теплообміну та гідродинаміки в трубі плоскоовального профілю. Завдяки ретельному налаштуванню розрахункової сітки, адекватному встановленню граничних умов та правильному вибору моделі турбулентності було досягнуто добру узгодженість результатів моделювання з експериментальними даними. Отримані розбіжності для числа Нуссельта (Nu) не перевищують 14 %, а для коефіцієнта аеродинамічного опору (ξ) – 13 %, що підтверджує практичну придатність використання CFD-методів на етапі проектування теплообмінного обладнання.

У ході дослідження встановлено, що головними джерелами похибок при моделюванні є:

- ідеалізація геометрії, яка не враховує шорсткість та конструктивні дефекти реальних зразків;
- використання стандартних турбулентних моделей, які недостатньо точно відображають складні гідродинамічні ефекти у приконтактних зонах;

- обмежена деталізація сітки в критичних зонах із високими градієнтами;

- спрощені або неточні граничні умови та властивості середовища.

Для підвищення точності CFD-розрахунків доцільно:

- використовувати більш точні моделі турбулентності (наприклад, SST $k-\omega$ або LES);
- покращувати деталізацію геометричної моделі шляхом включення мікрошорсткості та конструктивних особливостей;

- проводити детальні тестування для вибору оптимальної густини сітки (mesh independence study);

- використовувати експериментально отримані значення фізичних параметрів матеріалів та робочих середовищ.

Результати чисельного моделювання продемонстрували, що CFD-методи дозволяють значно зменшити обсяг та витрати на проведення лабораторних досліджень, а також скоротити терміни проектування та оптимізації теплообмінних пристроїв. Зокрема, використання SolidWorks Flow Simulation на початкових стадіях проектування теплообмінників дає змогу попередньо оцінити теплогідравлічні характеристики та виявити потенційні проблеми без фізичного виготовлення дослідних зразків.

Подальші дослідження доцільно зосередити на моделюванні несталих (transient) режимів для точнішого опису динаміки теплообміну, проведенні порівняльного аналізу різних турбулентних моделей у вузьких каналах складної геометрії, створенні верифікаційної бази експериментальних даних для нестандартних профілів труб, а також розробці спеціалізованих CFD-модулів і впровадженні методів машинного навчання для автоматизації вибору параметрів розрахунку та підвищення точності моделювання.

Таким чином, поєднання чисельного та експериментального підходів у дослідженні теплообміну в плоскоовальних трубах формує надійне підґрунтя для розробки ефективного й економічно доцільного теплоенергетичного обладнання.

Література

1. Нагірний В., Куць В. Розвиток засобів діагностики сенсорних мереж двоконтурних систем опалення. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. Вип. 3. С. 84-87. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-11>
2. Микійчук Б., Яцук В. Математична модель теплової ефективності приміщення з урахуванням показника якості теплопостачання. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. Вип. 1. С. 74-81. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-10>
3. Василенчук М., Горбійчук М., Когутяк М. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2023. Вип. 3. С. 144-153. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17>
4. Ковтун І., Бойко Ю., Батовський В. Діагностування міцності компаундованих конструкцій електронної техніки при термоциклуванні. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2020. Вип. 1. С. 28-33. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2020-65-1-5>
5. Кулинич В., Рогачов В., Терех О., Терех О. Дослідження інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору всередині плоскої труби. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2 (72). С.83-94. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279675>
6. Pysmennyy Ye., Semeniako O. Experimental and numerical investigations of local flow and heat transfer characteristics of partially finned flat-oval tubes, International Journal of Thermal Sciences. 2025. Vol. 209. 109539. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109539>
7. Deeb R. New correlations for predicting convective heat transfer of single and multi-row heat exchangers employing staggered drop-shaped tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. Vol. 202. 123689. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123689>
8. Pis'mennyi E. N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. Thermal Engineering. 2012. Vol. 59, No. 6. Pp. 485-490. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601512060080>
9. Pourdel H., Afrouzi H. H., Akbari O. A., Miansari M., Toghraie D., Marzban A. and Koveiti A. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in flat tube. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Pp. 3471-3483. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7529-8>
10. Рева С.А. CFD-моделювання течії всередині гвинтоподібних труб. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 4 (50). С.119-125. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.128315>
11. Свинчук О.В., Клименко Я.В. Аналіз сучасних засобів моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки перебігу рідин в трубах. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2024. №1(7). С. 92-98. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-13>
12. Sigalotti L. D. G., Alvarado-Rodríguez C. E., Rendón O. Fluid Flow in Helically Coiled Pipes. Fluids. 2023. Vol. 8(12). 308. <https://doi.org/10.3390/fluids8120308>
13. Ivanov A.V., Trebunskikh T.V., Platonovich V.V. Validation Methodology for Modern CAD-Embedded CFD Code: from Fundamental Tests to Industrial Benchmarks. White Paper. 33 p. <https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow Validation Methodology-Whitepaper.pdf>
14. Dabestani A., Kahani M. CFD analysis of rotation effect on flow patterns and heat transfer enhancement in a horizontal spiral tube heat exchanger. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. 105494. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105494>

References

1. Nahirnyi V., Kuts V. Development of diagnostic tools for sensor networks of double-circuit heating systems. *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2024. Vol. 3. Pp. 84–87. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-11>
2. Mykiychuk B., Yatsuk V. Mathematical model of thermal efficiency of a room taking into account the heat supply quality indicator. *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2024. Vol. 1. Pp. 74–81. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-10>
3. Vasilenchuk M., Horbiychuk M., Kogutyak M. Synthesis of linearized mathematical models of a heater with an intermediate coolant. *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2023. Vol. 3. Pp. 144–153. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17>
4. Kovtun I., Boyko Yu., Batovsky V. Diagnostics of the strength of compounded electronic structures during thermal cycling. *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2020. Vol. 1. Pp. 28–33. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2020-65-1-5>
5. Kulinich V., Rogachov V., Terekh O., Terekh O. Investigation of Heat Transfer Intensity and Aerodynamic Resistance Inside a Flat Tube. *Energetics: Economics, Technology, Ecology*. 2023. No. 2 (72). Pp. 83–94. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279675>
6. Pysmennyy Ye., Semeniako O. Experimental and numerical investigations of local flow and heat transfer characteristics of partially finned flat-oval tubes, *International Journal of Thermal Sciences*. 2025. Vol. 209. 109539. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109539>
7. Deeb R. New correlations for predicting convective heat transfer of single and multi-row heat exchangers employing staggered drop-shaped tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 202. 123689. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123689>
8. Pis'mennyy E. N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59, no. 6. Pp. 485–490. <https://doi.org/10.1134/S0040601512060080>
9. Pourdel H., Afrouzi H. H., Akbari O. A., Miansari M., Toghraie D., Marzban A. and Koveiti A. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in flat tube. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. Pp. 3471–3483. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7529-8>
10. Reva S.A. CFD Modeling of Flow Inside Helical Tubes. *Energetics: Economics, Technology, Ecology*. 2017. No. 4 (50). Pp. 119–125. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.128315>
11. Svyinchuk O.V., Klymenko Ya.V. Analysis of Modern Tools for Modeling Heat Transfer and Fluid Flow Hydrodynamics in Pipes. *Infocommunication and Computer Technologies*. 2024. Vol. 1(7). Pp. 92–98. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-13>
12. Sigalotti L. D. G., Alvarado-Rodríguez C. E., Rendón O. Fluid Flow in Helically Coiled Pipes. *Fluids*. 2023. Vol. 8 (12). 308. <https://doi.org/10.3390/fluids8120308>
13. Ivanov A.V., Trebunskikh T.V., Platonovich V.V. Validation Methodology for Modern CAD-Embedded CFD Code: from Fundamental Tests to Industrial Benchmarks. White Paper. 33 p. https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Validation_Methodology-Whitepaper.pdf
14. Dabestani A., Kahani M. CFD analysis of rotation effect on flow patterns and heat transfer enhancement in a horizontal spiral tube heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 64. 105494. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105494>