

## ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.94:66.045.122

КУБАХ С. О.\*, ЦАПАР В. С.

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

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМІННИКА У НАФТОГАЗОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

З погляду літературного аналізу, найбільш оптимальним методом впровадження теплообмінників у виробничі процеси є використання обчислювальної гідродинаміки для моделювання. В контексті промисловості, досягнення енергоефективності, безпеки та забезпечення стабільної функціональності установок є критично важливими завданнями. Використання комп'ютерного моделювання розширює можливості дослідження процесів теплообміну, зокрема в теплових установках, таких як кожухотрубні теплообмінники.

Імітаційне моделювання дозволяє передбачати процеси, створювати точні моделі об'єктів, аналізувати їх та досліджувати параметри системи. Воно покращує процеси прийняття рішень, зменшує ризики і сприяє розвитку всієї нафтогазової промисловості. Комп'ютерні моделі легше і зручніше вивчати, вони дозволяють проводити обчислювальні експерименти, реальна реалізація яких є складною або може призвести до непередбачуваних результатів. Усі ці аспекти спрямовані на більш глибоке і детальне розуміння процесів теплообміну, що відкриває можливості для їх подальшого вдосконалення у майбутньому.

Попередні дослідження вказують на відсутність рекомендацій щодо оптимізації теплообмінних систем та недостатню деталізацію важливих параметрів під час моделювання, а саме розміри моделі, властивості матеріалів. У цьому контексті дана робота акцентує увагу на налаштуванні моделі реального масштабу з основним акцентом на аспектах теплообміну та впливі турбулентності на зміну температури нафти та пари. Окрім того, отримано загальний коефіцієнт теплопередачі та визначено, як його зміна корелює з швидкістю потоку.

Ця робота підкреслює важливість моделювання в хімічних процесах як важливого інструменту для підвищення ефективності, забезпечення безпеки та надійності операцій. Отримані результати аналізу і налаштування надають інформацію про процес конфігурації моделі та її оптимальний режим роботи. На сьогоднішній день, перспективи досліджень представляють великий потенціал для вдосконалення процесу підігріву нафти. Оптимізація конструкції теплообмінника, програмне забезпечення та автоматизований контроль неперервно зазнають покращень.

**Ключові слова:** обчислювальна гідродинаміка, кожухотрубний теплообмінник, енергоефективність, комп'ютерне моделювання, оптимізація теплообмінних систем, імітаційна модель, нафтогазова промисловість, коефіцієнт теплопередачі.

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2023.288245

\*Corresponding author: seregakubakh@gmail.com

Received 21 August 2023; Accepted 14 September 2023

**Постановка проблеми.** Нафта, яка використовується для електрознесолювання, при природній температурі містить різні домішки, такі як солі, вода та важкі фракції. Ці домішки можуть ускладнювати процес обробки та сприяти накопиченню їх на поверхні теплообміну [1-3]. Підігрів нафти перед подачею в електрознесолюючу установку має важливе значення в процесі обробки нафти. Він допомагає знизити в'язкість електролітичного розчину, який використовується в процесі електрознесолення, що полегшує видалення солей з нафти.

Вибір температури визначається властивостями сирової нафти. У дослідженні [4] вказано, що оптимальною температурою знесолення слід вважати від 115 до 120 °С. Температури від 120 °С до 140 °С – для важких, в'язких вуглеводнів. При підвищенні температури в'язкість нафти знижується, що призводить до прискорення

швидкості потоку при заданій витраті. Також зменшення в'язкості полегшує процес осідання, що дозволяє частинкам води швидше випадати в осад. При цьому різниця в щільності водної та нафтової фаз майже завжди збільшується із зростанням температури. Підігрів нафти сприяє більш рівномірному розподілу деемульгатора по поверхні розділу, а також покращує процес його заміщення [5]. Виникають певні складнощі у процесі підігріву, що є важливим у процесі видалення домішок, що знаходяться у сирій нафті. Домішки можуть вплинути на якість нафти та ускладнити подальші етапи переробки та транспортування. Контроль та оптимізація процесу підігріву нафти є складним завданням, пов'язаним з неоднорідністю та нелінійністю реальних систем, впливом різних параметрів та обмеженнями виробництва.

Імітаційне моделювання надає можливість вирішити більшу частину проблем, пов'язаних із процесом підігріву нафти на виробництві, і водночас скоротити час та витрати, не завдаючи шкоди виробничій ефективності. За допомогою цієї методології враховується різноманітні параметри нафти та геометрія апаратів, дозволяючи проводити безліч віртуальних експериментів із швидкою зміною вхідних даних та аналізом отриманих результатів. Такий підхід сприяє оптимізації процесу та досягненню необхідних показників ефективності, що має важливе значення для зниження витрат на виробництві нафтопродуктів.

**Аналіз попередніх досліджень.** У роботі [6] були представлені етапи моделювання теплообмінника лабораторного масштабу з використанням CFD-моделювання (моделі обчислювальної гідродинаміки). У зв'язку з труднощами побудови повної реалістичної 3D-моделі, була застосована спрощена 2D-асиметрична модель для нагрівального дроту та його ізоляції. Це дозволило уникнути додаткових неточностей, які б вплинули на результати моделювання. Для перевірки моделі використовувалися різні методи вимірювання, включаючи датчик температури та інфрачервону камеру. Однією з головних переваг CFD-моделювання, виявлених авторами, є можливість раннього виявлення забруднень у моделі та передбачення терміну експлуатації обладнання, а також змін параметрів системи у дослідженнях теплообмінників, схильних до забруднення. Автори приділяють увагу запобіганню короткочасній експлуатації та виходу з ладу через підвищені робочі температури. При використанні спрощеної тривимірної геометрії, отриманої з двовимірної моделі нагрівального дроту, налаштування сітки процесу ускладнюється, тому нагрівальний провід був замінений граничною умовою. Це рішення обумовлено тим, що втрати інформації в даному випадку незначні, а пористість сітки стає більш плавною з прийнятно низьким часом обчислень. Проте, при масштабуванні моделі до реальних розмірів значно збільшиться похибка в результатах вимірювань, що може призвести до неточних результатів у теплових розрахунках. Використання спрощеної асиметричної моделі має певні обмеження у тривимірному просторі. Також варто звернути увагу на проблеми із вимірюванням температури, пов'язані з невизначеністю ручного вибору точок вимірювання. Важливість вибору правильної точки вимірювання температури полягає в тому, що неправильне визначення місця вимірювання може призвести до некоректних результатів, неадекватної оцінки продуктивності обладнання та зниження ефективності його використання. Раціональний вибір точок вимірювання, заснований на кореляційних методах та аналізі фізичних особливостей теплообмінника, дозволить отримати більш достовірні та точні дані, що сприяє підвищенню якості моделювання та покращенню прогнозу роботи системи. Автори вказують на проблему, але не пропонують додаткових методів або алгоритмів для збільшення точності системи при визначенні оптимальних точок.

Автори в роботі [7] провели обчислювальне моделювання для аналізу продуктивності теплообмінника. Моделювання включало зміну термічних та геометричних параметрів. Дослідження враховувало деталі тиску, а також використовувало адекватну щільність сітки, дискретизацію та моделювання турбулентності. Порівнювалися різні моделі турбулентності, найкращою виявилася модель k-ε першого порядку дискретизації. Також автори визначили, що загальна теплопередача збільшується зі збільшенням відстаней між перегородками. У цій роботі є деякі обмеження та недоліки, які впливають на повноту та практичну значущість проведеного дослідження. По-перше, відсутність порівняння продуктивності розглянутого теплообмінника з іншими типами теплообмінників обмежує розуміння його переваг та недоліків щодо альтернативних конструкцій. Порівняльний аналіз із різними типами теплообмінників був би корисний з метою оцінки ефективності запропонованого теплообмінника за умов експлуатації і визначення його конкурентоспроможності над ринком. По-друге, автори не запропонували варіантів для оптимізації дизайну теплообмінника та усунення виявлених недоліків. Відсутність рекомендацій щодо покращення

продуктивності теплообмінника обмежує практичну застосовність роботи в інженерних та промислових додатках. Третім недоліком є неповнота аналізу причин неправильних результатів, зокрема у випадку 1. Відсутність подробиць або аналізу причин непередбачуваного підвищення теплопередачі залишає певну невизначеність в інтерпретації результатів і може ускладнювати застосування цих результатів у реальних інженерних завданнях.

В роботі [8] було виявлено, що збільшення температури біодизеля призводить до зниження його в'язкості і покращує швидкість згорання. Автори провели декілька експериментів з різними типами теплообмінників та з'ясували, що найкращі результати має багатоходовий кожухотрубний теплообмінник. Використання палива з нижчою в'язкістю поліпшує продуктивність процесу. Однак, ці ефекти спостерігаються тільки після досягнення стаціонарного режиму. Основний недолік цієї статті полягає у недостатній інформації про властивості матеріалу, який використовується для підігріву у процесі моделювання. Автори згадують зниження в'язкості палива, але не надають деталей щодо його характеристик. Крім того, не було надано достатньо інформації про обраний ламінарний потік у процесі моделювання. Відсутні дані про розміри всіх теплообмінників, що ускладнює оцінку ефективності процесу теплообміну.

В результаті CFD дослідження [9] вставки гвинтової стрічки з коефіцієнтом крутки 1,92 в трубі було виявлено, що ця вставка діє як підсилювач теплопередачі в умовах ламінарного потоку. У програмному забезпеченні автори визначили, що вставка значно збільшила швидкість теплопередачі, але також зріс перепад тиску. Гвинтові стрічкові вставки забезпечують ефективну економію енергії, оскільки покращення теплопередачі перевищує зниження тиску на тертя. Встановлення труби із вставкою призводить до зниження температури стінки труби, що вказує на зменшення незворотних втрат та підвищені характеристики теплопередачі. У цій роботі виявлено деякі неточності, пов'язані зі складною конструкцією гвинтової стрічки та відсутністю опори для зниження вібрації. У дослідженні використані певні спрощення моделі, такі як температура та тепловий потік, а також автори не згадують про інші типи потоків, окрім ламінарного.

Було проаналізовано різні матеріали для труб та оболонки теплообмінника, що вказано в роботі [10], застосовуючи програмне забезпечення для оптимізації температурних варіацій між матеріалами. За результатами дослідження було укладено, що дизайн труб із зигзагоподібним візерунком забезпечує ефективніший тепловий обмін у теплообміннику порівняно з іншими варіантами. При розробці нового типу теплообмінника на виробництві автори нехтують компактністю, що може призвести до додаткових витрат на їх заміну та модернізацію. Крім того, необхідно враховувати можливі складнощі, пов'язані з обслуговуванням нового типу теплообмінника та мертвих зон, що можуть впливати на теплообмін. Дані результати малоймовірно будуть застосовні у виробничих процесах через відсутність інформації про матеріали та високу частку використання труб, розташованих щільно один до одного.

Надійність та адекватність чисельних симуляцій дозволяє підтвердити ефективність застосування турбулентних моделей. Автори роботи [11] успішно порівняли дані випробувань двотрубного теплообмінника при різних швидкостях потоку та температурних значеннях. Важливо відзначити, що відсутність універсальної турбулентної моделі може бути недоліком, оскільки це вимагає додаткової турботи з боку інженера при виборі кращої моделі для конкретного проекту.

В дослідженні [12] було створено тривимірну модель експериментального кожухотрубного теплообмінника для імітації поведінки потоків повітря та води. Використовується холодний потік з температурою 80 °C та гарячий з температурою 100 °C. За результатами спостережень можна побачити розрахунок числа Рейнольдса та загальний коефіцієнт теплопередачі, що розрахований за допомогою методу логарифмічної середньої різниці температур. Недоліком роботи є те, що в роботі не має обґрунтування вибору конкретного матеріалу для теплообмінника. Також не були надані розміри самого апарату, які могли б допомогти зрозуміти вплив загального коефіцієнта теплопередачі. Недоліком роботи також є відсутність графіка розподілу температури в процесі моделювання, оскільки цей графік дозволяє оцінити ефективність системи.

У дослідженні [13] було проведено чисельний аналіз для оцінки ефективності апарату при зміні температури та реалізовано тривимірну модель кожухотрубного теплообмінника. Вода та повітря підтримувалися при 70-80 °C і 5-10 °C відповідно, щоб налаштувати різні комбінації температур на вході під час моделювання. Передбачається, що ефективність теплообмінника коливатиметься від 0,41 до 0,56 залежно

від температури. Це спостереження показало, що підвищення температури води на вході та зниження температури повітря може призвести до високої ефективності. Автори не запропонували варіантів підвищення коефіцієнту теплообміну та немає порівняння або посилання на переваги матеріалу для апарату, а саме нержавіючої сталі. Не вказано для яких розмірів моделі був розрахований загальний коефіцієнт теплопередачі, що не дає можливості зрозуміти ефективність процесу. У статті коротко згадується створення сітки, включаючи уточнення кутів, формування вільного тетраедра та граничних шарів. Однак у ньому відсутні такі важливі деталі, як кількість елементів, розмір та критерії якості сітки. Ці деталі є важливими для розуміння точності та надійності результатів моделювання. Не розглядаються обмеження на етапі моделювання та доцільності отриманих результатів у промисловому масштабі.

**Метою** роботи є пошук оптимального режиму роботи теплообмінника шляхом дослідження імітаційної моделі.

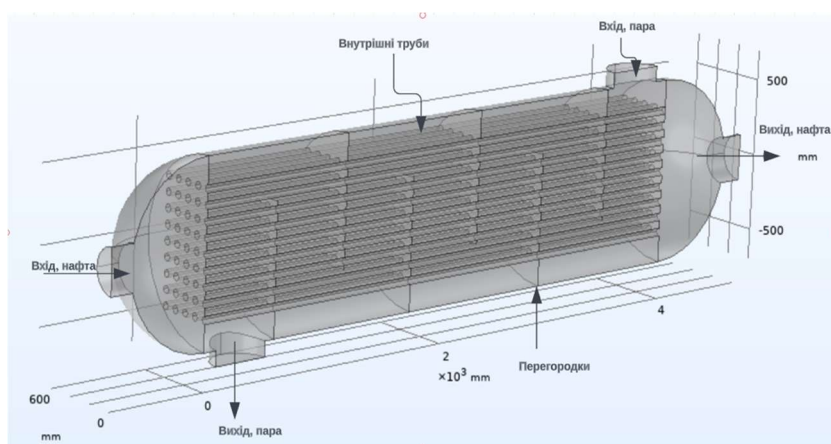
**Виклад основного матеріалу.** Популярність потужного програмного забезпечення для моделювання зростає разом із використанням комп'ютерів для інженерних розрахунків. Завдяки комп'ютерному моделюванню можна отримати чітке зображення складних фізичних явищ, які відбуваються в хімічних процесах. Такі симуляції надають візуальне представлення концепцій, які важко уявити: градієнти концентрації, профілі швидкості та інші показники. Воно використовує простий принцип розділення всієї системи на невеликі комірки або сітки з застосуванням керівних рівнянь до цих дискретних елементів. Це дозволяє швидше знайти чисельні рішення щодо розподілу тиску, температурних градієнтів, параметрів потоку та інших параметрів з меншими витратами, що є вагомою перевагою у контексті необхідності проведення експериментальних досліджень.

Теплообмінники, як правило, є відповідальним хіміко-технологічним обладнанням у переробних виробництвах та атомних електростанціях. Вони бувають різних видів, але основна увага приділяється кожухотрубному теплообміннику для розробки моделі та аналізу оптимального режиму роботи.

Кожухотрубні теплообмінники (рис. 1) є одними з найбільш широко використовуваних типів теплообмінників у переробній промисловості. Імітаційна модель кожухотрубного теплообмінника побудована з метою оцінки його конструкції та проведення термічного моделювання, яке забезпечує повне розуміння поведінки системи за різних сценаріїв. Вивчаючи вплив температури на конструкцію, можна отримати цінні відомості, які дозволять швидко налаштувати параметри для досягнення оптимальної продуктивності процесу. Ключовим фактором для ефективної роботи теплообмінника є максимізація коефіцієнта теплопередачі. Тому важлива компактність, яка досягається за рахунок малого співвідношення поверхні теплообміну до маси та зменшеного об'єму, що забезпечує ефективний транспорт пари [14]. У той час як альтернативні конструкції, такі як пластинчасті та спіральні теплообмінники, можуть похвалитися вищою ефективністю, здатністю до самоочищення та простотою обслуговування під час експлуатації, кожухотрубні теплообмінники продовжують домінувати на ринку, займаючи 65% його частки [15]. Це пояснюється їх високою теплопровідністю, придатністю до роботи в агресивних середовищах і широким діапазоном робочих тисків і температур.

Дослідження властивостей нафт Передкарпатської нафтогазоносною області України [16] показало, що нафта на цих родовищах є доброю сировиною для одержання бензину, реактивних і дизельних палив, олив та котельного палива, а також мають високий вміст бензинових фракцій та низький вміст сірки та води. Характеристики нафти використовуються для побудови залежностей при створенні матеріалу у програмному забезпеченні.

В якості основного матеріалу апарату використовується нержавіюча сталь, яка є кращим матеріалом для теплообмінника завдяки своїм унікальним властивостям. Нержавіюча сталь має стійкість до корозії та навколишнього середовища, що робить її ідеальним вибором для використання в агресивних умовах і при роботі з різними флюїдами [17]. Крім того, вона має непогану теплопровідність, що дозволяє ефективно передавати тепло. Це особливо важливо для теплообмінників, де ефективність передачі тепла грає вирішальне значення. Дослідження показали, що нержавіюча сталь забезпечує ефективність теплообміну та має довгий термін служби [18]. При моделюванні теплообмінника здійснюються розрахунки, які дозволяють визначити оптимальні параметри його роботи, які максимізують теплообмін та мінімізують втрати енергії. Це дозволяє підвищити ефективність системи. Таким чином, моделювання теплообмінника є важливим кроком у оптимізації виробничого процесу та може призвести до значної економії ресурсів та підвищення ефективності роботи установки.



**Рис. 1 – Геометрія теплообмінника з фіксованою трубчастою пластиною**

Концепція, яка використовується для проектування кожухотрубного теплообмінника, розглядається шляхом вивчення робочої моделі проточного однопрохідного кожухотрубного теплообмінника з перехресним потоком. Геометрія такої моделі показана на рисунку 1. У цьому прикладі дві рідини проходять через теплообмінник. Перша рідина, у цьому випадку нафта, протікає через труби, тоді як друга рідина, пар, циркулює всередині оболонки теплообмінника, але поза трубами. Обидві ці рідини мають різні початкові температури при вході в теплообмінник, однак після циркуляції в ньому рідини наближаються до температури рівноваги. Перегородки створюють певний перехресний потік пари, збільшуючи площу теплообміну. Ще одна перевага полягає в тому, що перегородки зменшують вібрацію через рух рідини. Чисельні значення геометрії теплообмінника наведені у таблиці 1.

У цій моделі використовується попередньо визначений мультифізичний зв'язок Nonisothermal Flow, налаштований за допомогою моделі турбулентності k-ε. У кожухотрубних теплообмінниках використовується зазвичай турбулентний потік, який забезпечує безперервне перемішування рідини всередині труб. Це сприяє контакту всіх крапель нафти з гарячою стінкою труби, забезпечуючи ефективніший процес теплообміну. Спрощення відбувається тільки з урахуванням симетрії. Моделювання лише однієї половини теплообмінника дає суттєві переваги, тим самим зменшуючи розмір моделі та витрати на обчислення. У деяких простих моделях теплопередачі, особливо у разі однорідних із простою геометрією, використання теплового потоку може бути зручним та ефективним способом спрощення. Однак, при моделюванні складної геометрії можуть бути втрати при тепловому аналізі. Для запобігання цьому можна скористатися спрощенням інших параметрів, таких як якість сітки та використання симетрії, якщо вони не впливають суттєво на результати. Це дозволяє підвищити ефективність моделювання теплопередачі та знизити втрати тепла.

**Таблиця 1 – Розміри та кількість елементів**

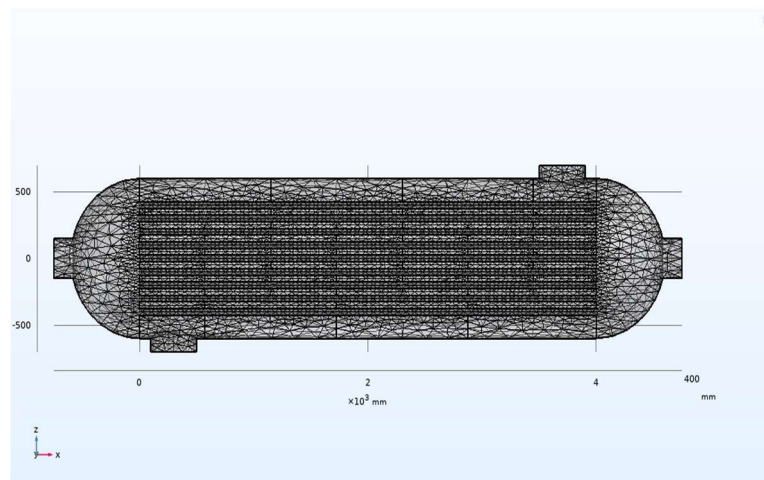
Геометрія	Значення
Довжина труби	4000 мм
Кількість труб	72 шт
Внутрішній діаметр труби	25 мм
Зовнішній діаметр труби	27 мм
Кількість перегородок	6 шт
Відстань між перегородками	575 мм

Тривимірну область було створено на основі реальних розмірів. На рисунку 2 показано обчислювальну площину апарату та початкові умови, використані в налаштуванні моделювання. Обчислювальна площина була розділена на ряд дискретних об'ємних елементів. Вибір методу сітки при моделюванні теплообмінника може змінюватися в залежності від складності побудови апарату. При виборі сітки важливу роль відіграє інтуїція [19]. У моделі використовувався підхід побудови сітки за замовчуванням, що будується з кінцевих

елементів різного типу та розміру. У таблиці 2 наведена інформація про якість сітки. Це рішення мало на меті спростити проблему та зменшити її складність. Було виявлено, що використання початкової сітки дає задовільні результати. На рисунку 2 візуальне представлення остаточної конфігурації сітки. У таблиці 3 представлені початкові значення швидкості та температури рідин.

**Таблиця 2 – Параметри сітки**

Параметр	Значення
Кількість всіх елементів	143053
Мінімальна якість елемента	0,01416
Середня якість елемента	0,4335
Трикутні елементи	27369
Крайові елементи	8253



**Рис. 2 – Обчислювальна площина та сітка**

**Таблиця 3 – Деталі граничних умов**

Місцезнаходження	Початкові значення
Вхід нафти	Швидкість потоку на вході: 1,5 м/с Температура на вході: 22°C
Вихід нафти	Відтік
Вхід гарячої пари	Швидкість потоку на вході: 30 м/с Температура на вході: 120°C
Вихід гарячої пари	Відтік

Для покращення результатів моделювання оптимального режиму у програмному забезпеченні існує можливість проводити оптимізацію, що надаються окремим модулем. Оптимізація параметрів моделі може значно підвищити точність та достовірність результатів. Один із ключових аспектів оптимізації полягає в детальному доборі розміру сітки у різних частинах моделі. В площинах з високим градієнтом температур, де відбувається інтенсивна теплопередача, слід використовувати дрібнішу сітку для більш точного опису процесів. У той же час, в інших площинах можна застосувати більшу сітку, що сприяє зниженню обчислювального навантаження, зберігаючи при цьому адекватну точність. Оптимізація моделі теплопередачі є багатограничним процесом, що включає не тільки ретельне вивчення параметрів моделі турбулентності, але й розгляд альтернативних підходів до управління течією.

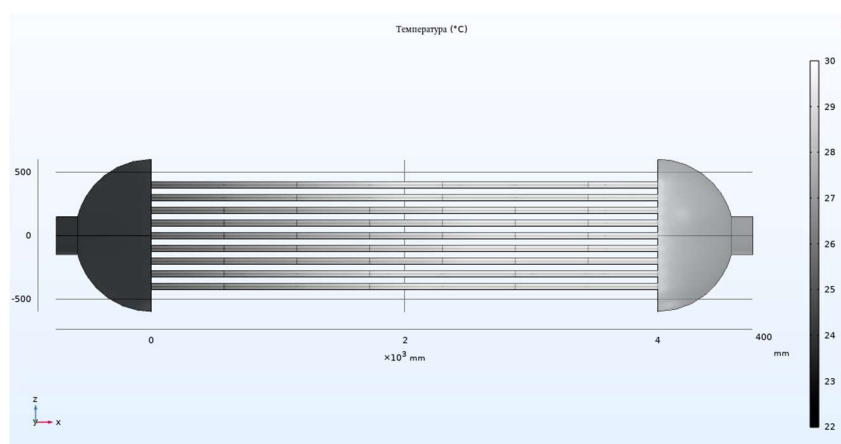
Важливим аспектом оптимізації є детальне дослідження різних варіантів налаштування параметрів турбулентності, що виходять за межі налаштувань за замовчуванням програмного забезпечення. Керування

тиском дозволяє контролювати швидкість, напрямок та рівномірність потоку, що може суттєво вплинути на ефективність теплопередачі.

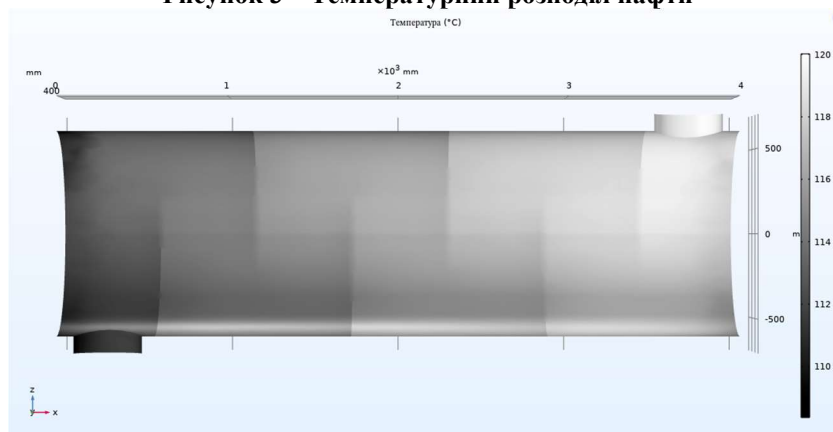
Оптимізація процесу моделювання є багаторівневим завданням. Особливу увагу слід звернути на функцію Point Control Variable, яка у поєднанні з Parametric Sweep дозволяє ефективно керувати переміщенням та масштабуванням елементів. Також це дозволяє проводити параметричні дослідження з різними комбінаціями параметрів у межах одного вирішувача. Це може бути важливим інструментом вивчення впливу різних параметрів для визначення оптимальних умов системи.

Таким чином, оптимізація дозволяє створювати більш точні, надійні та економічно ефективні рішення, які відповідають вимогам сучасної інженерної практики та сприяють оптимальній роботі технічних систем при різних умовах експлуатації.

На рисунку 3 показано прогнозований температурний профіль потоків нафти. З нього видно, що температура нафти становила 22 °C і 26 °C у місцях, розташованих поблизу входу та виходу з боку труби. Температура пари знизилася на виході, як видно з рисунка 4, а нафти навпаки. Це можна пояснити тим, що відбувався процес теплообміну у середині апарату. Зміна температури обумовлена процесом теплообміну, характерним для даного типу обладнання.



**Рисунок 3 – Температурний розподіл нафти**



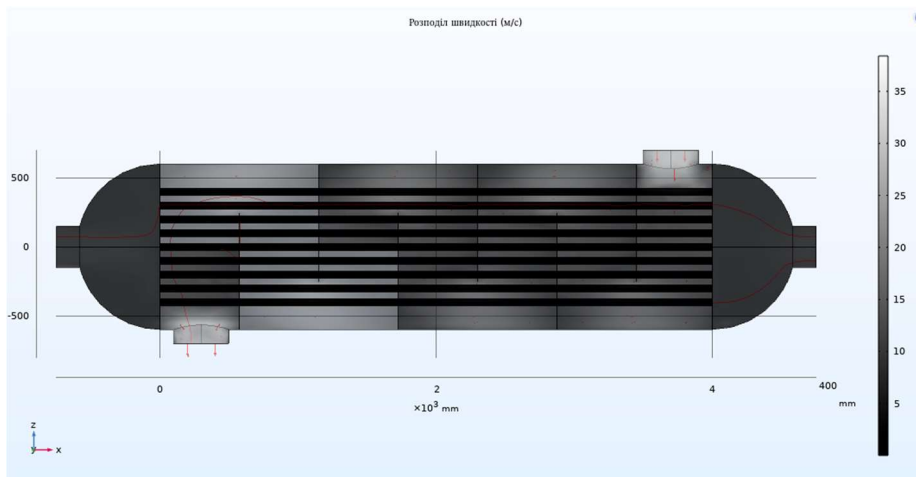
**Рисунок 4 – Температурний розподіл пари**

На рисунку 5 показано прогнозований розподіл швидкості нафти в теплообміннику, два потоки знаходяться у протиріччі. Рисунок показує рівномірний розподіл швидкостей усередині апарату. Перед надходженням рідини до труб є зони рециркуляції. Кольори обтічних ліній являють собою швидкість потоку.

Програмне забезпечення дозволяє розраховувати число Рейнольдса, яке відіграє важливу роль у проектуванні та аналізі систем, щоб зрозуміти та передбачити тип потоку та його характеристики як вказано у посібнику користувача [20]. Його можна розрахувати за формулою:

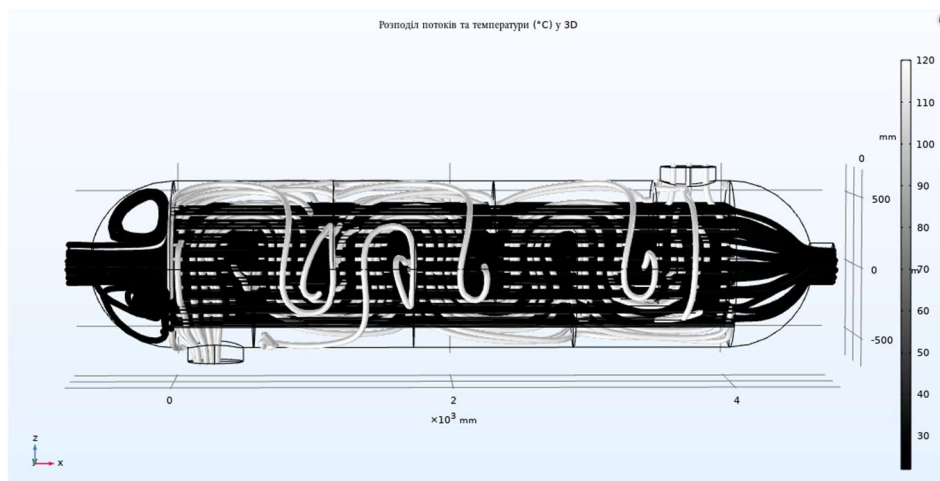
$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність рідини, Вт/ м·К,  $u$  – швидкість рідини,  $D_h$  - гідравлічний діаметр труби,  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини.



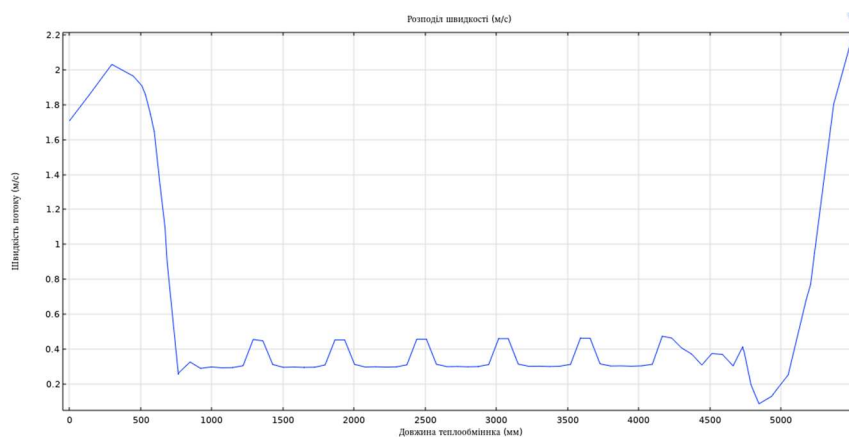
**Рисунок 5 – Розподіл швидкості потоків та температури**

Чітко видно зони зміни температури внаслідок контакту з перегородками на рисунку 5. Ця інформація може допомогти з дизайном трубопроводів та заміни відповідних матеріалів, які знижують ефективність передачі тепла. Розподіл температури вказує на області, де теплообмін більш інтенсивний або менш інтенсивний. Ми можемо виявити зони, де необхідно оптимізувати теплообмін. Окрім того можна побачити розподіл швидкості потоку теплоносія всередині апарату з рисунка 6. З рисунка 7 видно падіння швидкості потоку на вході та збільшення на виході. Зміну температури по довжині труби можна побачити з рисунка 8. З нього видно, що при постійній швидкості нафти відбувається лінійне зростання температури в стаціонарному режимі.

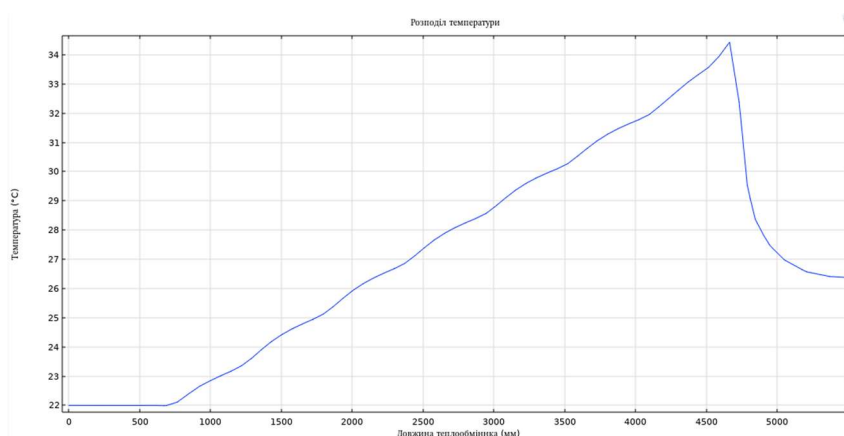


**Рисунок 6 – Розподіл швидкості потоків та температури у 3D**





**Рисунок 7 – Розподіл швидкостей у внутрішній трубі по довжині теплообмінника**



**Рисунок 8 – Розподіл температури у внутрішній трубі по довжині теплообмінника**

Коефіцієнт тепловіддачі є фундаментальним параметром, що характеризує ефективність теплообміну між твердою поверхнею і рідиною [21]. Він визначає кількість тепла, що передається між тілами за одиницю часу та одиницю площі поверхні. Чим вище коефіцієнт теплопередачі, то швидше відбувається теплообмін. Значення цього параметра важливе для проектування та оптимізації теплообмінних процесів у різних промислових та наукових додатках. Підвищення цього коефіцієнта є надзвичайно важливим для оптимізації теплового керування в широкому діапазоні промислових застосувань [22]. Завдяки своїй здатності розв'язувати керівні рівняння теплопередачі, потоку рідини та зміни фази, програмне забезпечення дозволяє проводити комплексні дослідження різних стратегій посилення теплопередачі. Завдяки систематичному моделюванню можна кількісно визначити коефіцієнт теплопередачі за різних умов і оцінити ефективність різних методів посилення. За допомогою таких підходів, як збільшення швидкості рідини, модифікація геометрії поверхні, використання покращених поверхонь теплопередачі та впровадження процесів зміни фази, можна значно покращити коефіцієнт. Він розраховується за рівняннями на основі витрати та температури на вході та виході [23, 24]. Його можна розрахувати за допомогою формули:

$$U = \frac{Q}{AT_m} \quad (2)$$

$Q$  – середній тепловий потік між рідинами, і він виходить із наступного рівняння [25]:

$$Q = \frac{Q_c + Q_h}{2} \quad (3)$$

$$Q_c = m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (4)$$

$$Q_h = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (5)$$

$Q$  – середній тепловий потік,  $Q_c$  – теплопередача в холодній рідині,  $Q_h$  – теплопередача в гарячій рідині,  $m_c$  – масова витрата холодної рідини,  $m_h$  – масова витрата гарячої рідини,  $C_{pc}$  – питома теплоємність у холодній рідині,  $C_{ph}$  – питома теплоємність у гарячій рідині,  $T_m$  – логарифм середньої різниці температур для холодного та гарячого потоку.

Логарифм середньої різниці температур для кожухотрубного теплообмінника з однопровідним проточним потоком можна отримати з наступного рівняння:

$$\Delta T_m = \frac{(t_2 - t_1)(\sqrt{1 + R^2})}{\ln \left[ \frac{2 - P(1 + R - \sqrt{1 + R^2})}{2 - P(1 + R + \sqrt{1 + R^2})} \right]} \quad (6)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (8)$$

$t_1$  – температура на вході труби,  $t_2$  – температура на виході труби,  $T_1$  – температура на вході корпусу,  $T_2$  – на виході з корпусу,  $A$  – поверхня теплообміну на стороні труби, отримується з наступного рівняння:

$$A = (\pi d_0 L_t) N \quad (9)$$

$N$  – кількість трубок,  $d_0$  – діаметр випускної труби,  $L_t$  – довжина труби.

Коефіцієнт теплопередачі для теплообмінника виходить з наступного рівняння [26, 27]:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{d_i \ln \left( \frac{d_0}{d_i} \right)}{2k_1} + \frac{d_i}{d_0 h_0} \quad (10)$$

$h_i$  – коефіцієнт теплопередачі для сторони трубки,  $h_0$  – коефіцієнт теплопередачі для сторони стінки,  $k_1$  – теплопровідність труби,  $d_i$  – внутрішні діаметри труб,  $d_0$  – зовнішні діаметри труб.

В цій моделі значення коефіцієнта становить 7,45 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Висновки.** Основна увага приділяється фундаментальним аспектам розробки імітаційних моделей з використанням програмного забезпечення. Проведення аналізу елементів системи на мікрорівні забезпечило поглиблене розуміння процесу конфігурування моделі та перспектив її подальшої оптимізації. З іншого боку, це дослідження надає можливість інтуїтивного сприйняття внутрішніх процесів завдяки візуальній інтерпретації результатів моделювання. За результатами проведеного імітаційного моделювання було отримано чисельне значення загального коефіцієнта теплопередачі, що надає уявлення про взаємодію потоків всередині апарату з урахуванням реальних геометричних розмірів.

Вплив початкової швидкості потоків у трубопроводах істотно впливає на характер і ефективність процесів теплообміну. Вищі початкові швидкості супроводжуються більш інтенсивними втратами швидкості через виражені гідродинамічні фактори, такі як тертя і турбулентність, що в кінцевому підсумку призводить до зменшення швидкості потоку. З іншого боку, при нижчих початкових швидкостях втрати швидкості менш виражені і вказують на переважання більш ламінарного характеру потоку. При збільшенні швидкості потоку нафти відзначається зменшення температури на виході із системи. Цей феномен обумовлений інтенсивнішим відведенням тепла від нафти до пари та вищою швидкістю руху середовища. Таким чином, спостерігається зниження температури, обумовлене підвищеною ефективністю процесу теплообміну, коефіцієнт

теплопередачі підкреслює ефективну взаємодію між флюїдами. У результаті видно підвищення ефективності теплопередачі під час використання щільно упакованих труб.

З результатів енергетичного балансу видно, що теплопередача в процесі, а також втрати тепла в навколишнє середовище демонструють збільшення як при підвищенні тиску пари, так і при збільшенні швидкості потоку нафти. Була отримана лінійна залежність зміни температури від швидкості в процесі моделювання. Програмне забезпечення надає швидко можливість внесення змін до геометрії чи початкових умов моделювання.

Імітаційна модель, викладена вище, орієнтована на здійснення експериментального та чисельного аналізу процесу теплообміну між потоками нафти і пари. Враховані під час дослідження значення надають важливу інформацію про оптимальний режим роботи теплообмінника. Завдяки ретельному налаштуванню робочих параметрів, що ґрунтуються на результатах моделювання, промислові суб'єкти здатні домогтися істотних енергетичних економій, що позитивно впливає на зменшення витрат виробництва.

**Перспективи подальших досліджень.** Надалі перспективи досліджень можуть бути спрямовані на вивчення впливу різних типів перегородок та їх кількість в теплообміннику, що дозволить оптимізувати процес підігріву нафти. Експерименти з різними конфігураціями перегородок можуть допомогти виявити оптимальне рішення для системи підігріву.

Ще однією перспективою є побудова математичної моделі теплообмінника, яка описуватиме характеристики процесу підігріву нафти. Моделювання теплообміну з використанням рівнянь теплопередачі та масообміну дозволить покращити передбачуваність процесу та оптимізувати його роботу.

Крім того, подальші дослідження можуть бути спрямовані на налаштування регулятора, який ґрунтуватиметься на даних про склад і властивості нафти, що надходить, і автоматично проводити налаштування системи на необхідні показники якості. Використання автоматизованих регуляторів дозволить забезпечити стабільність процесу підігріву та мінімізувати вплив фактору людської помилки.

У цілому, сьогодні перспективи досліджень становлять значний потенціал удосконалення процесу підігріву нафти. Оптимізація конструкції теплообмінника, математичне моделювання та автоматизований контроль дозволять досягати високої ефективності виробництва нафтопродуктів.

#### **Список використаної літератури**

1. M. Kaiser, J. H. Gary, G. E. Handwerk. *Petroleum Refining Technology and Economics*. New York: CRC Press, 2007. P. 488.
2. M. A. Fahim, T. A. Al-Sahhaf, A. Elkilani. *Fundamentals of Petroleum Refining*. Amsterdam: Elsevier, 2010. P. 516
3. Kamalifar S., Peyghambarzadeh S.M., Azizi S., Jamali-Sheini F. Experimental study on crude oil fouling in preheatexchangers at different operating conditions. *Thermal Science and Engineering Progress Journal*. 2023. Vol. 39, №1. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101742>
4. Vafajoo L., Ganjian K., Fattahi M. Influence of key parameters on crude oil desalting: An experimental and theoretical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2012. Vol. 90-91, P.107-111. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.04.022>
5. Martínez-Palou R., Camacho R.C., Chávez B., Aburto J. Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating. *The Science and Technology of Fuel and Energy*. 2013. Vol. 113, P.407-414. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>
6. Sass A., Kummer A., Ulbert Z., Egedy A. Failure Analysis of Heat Exchangers with a Valid CFD Simulation. *Periodica Polytechnica Engineering Journal*. 2021. Vol. 65 №4, P.536-549. URL: <https://doi.org/10.3311/PPch.17095>
7. Mohanty S., Arora R. CFD Analysis of a Shell and Tube Heat Exchanger with Single Segmental Baffles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 17, P.7890-7901.
8. Araavind S., Athreya A., S. CFD Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger for Pre-heating for Biodiesel. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2017. Vol. 6, P.687-693.
9. Mehedi T., Kazi A., Muhammad., Palash B., Mohammad R., Nanjappa A. CFD study of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of laminar flow through tube with helical screw tape insert. *Journal of Energy Procedia*. 2019. Vol. 160, P.499-706. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.19>

10. Kishan R., Singh D., Sharma A. CFD Analysis of Heat Exchanger Models Design Using Ansys Fluent. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2020. Vol. 11, P.1-9. URL: <https://www.doi.org/10.34218/IJMET.11.2.2020.001>
11. Rao P. D., Rao B. N. CFD Simulation And Valiation Through Test Data Of A Double Pipe Counter Flow Heat Exchanger. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8, P.818-831.
12. Andriawan, Tanujaya H., Riza A. Simulation and Study of Shell and Tube Type Heat Exchangers. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol.1007,. P.1-8. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012197>
13. Aujla G.S., Pandey S., Trivedi Y., Ghosh D., Sharma P., Tyagi A., Jain A. Effectiveness Analysis And Design Of Shell And Tube Heat Exchanger Using Comsol Multiphysics. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8, P.777–785.
14. Lelea A. F., Rönnebecka T., Rohdea C., Schmidta T., Kuznikb F., Rucka W. K. L. Modelling of heat exchangers based on thermochemical material for solar heat storage systems. *Energy Procedia Journal*. 2014. Vol. 61, P.2809-2813.
15. Lee H. S. Thermal Design Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells. New Jersey: John Wiley & Sons, 2022. P. 656.
16. Topilnytskyy P., Romanchuk V., Yarmola T. Investigation of oil properties from Ukraine Precarpathianoil and gaz region. *Chemistry, technology and application of substances journal*. Vol. 2, No. 2, 2019. P.102-109. URL: <https://doi.org/10.23939/ctas2019.02.102>.
17. Di Schino A. Manufacturing and Application of Stainless Steel. Basel, 2020. P.304
18. Thulukkanam K. Heat Exchanger Design Handbook. New York: CRC Press, 2016. P.1272
19. Reddy S. S., Dey T., Haribabu K., Krishnakumar H. Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers for Sea Water Cooling by COMSOL Multiphysics. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. P.264–270.
20. Comsol, Inc. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Stockholm: COMSOL AB, 2019. P. 1272
21. Lienhard J. Heat Transfer Handbook. Massachusetts: Phlogiston Press, 2020. P. 784
22. Adumene, S., Nwaoha, T.C., Ombor, G.P. and Abam, J.T. Design and Off-Design Performance Evaluation of Heat Exchanger in an Offshore Process Configuration. *Open Access Library Journal*. 2016. Vol.3. P.1-9. URL: <https://doi.org/10.4236/oalib.1102748>
23. Maakoul A., Laknizi. A., Saadeddine S., Metoui M., Zaita A., Meziane M., Abdellah A. Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles. *Thermal Engineering Journal*. 2016. Vol.109. P. 175–185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.067>
24. Azar R., Khalilarya S., Jafarmadar S. Tube bundle replacement for segmental and helical shell and tube heat exchangers: experimental test and economic analysis. *Thermal Engineering Journal*. 2014. Vol.62. P. 622–632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.009>
25. Pereira, I., Bagajewicz, M.: Global optimization of the design of horizontal shell and tube condensers. *Chemical Engineering Science Journal*. 2021. Vol.236. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116474>
26. He Z., Fang X., Zhang Z., Gao X. Numerical investigation on performance comparison of non-Newtonian fluid flow in vertical heat exchangers combined helical baffle with elliptic and circular tubes. *Thermal Engineering Journal*. 2016. Vol.100. P. 84–97. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.033>
27. Kumar, Bhramara N.R., Kirubeil P., Sundar A., Singh L.S., & Sousa M.K. Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer Journal*. 2018. Vol.95. P.53–62. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.020>

---

**Serhii Kubakh, Vitalii Tsapar**

#### **SIMULATION OF A SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER IN THE OIL AND GAS INDUSTRY**

*From the analysis of available literary sources, it follows that the most effective way of introducing heat exchangers into production processes is by using computational fluid dynamics (CFD) modeling. This method also involves fine-tuning the components from which the model is formed. Energy efficiency, safety, and stable functionality of units are key aspects of production activities. CFD modeling provides ample opportunities for studying heat exchange processes in thermal installations, such as tubular heat exchangers. Optimizing the operation of such systems implies*

careful adjustments, including creating a three-dimensional model taking into account real dimensions, and flexible adjustment of various flow regimes and thermal conditions.

Process flow heating and cooling processes are standard practice in various industries. These operations are often performed in heat exchangers where the fluid flows through tubes in laminar conditions. Heat transfer mechanisms in such conditions are complex and not yet fully explored, as they include both forced and natural convection. This creates difficulties in accurately predicting the design of the heat exchanger. The use of simplified geometric models and limited information about oil refining processes in computer simulations significantly affects the analysis and optimization possibilities. This approach can significantly accelerate the development of new types of heat exchangers. Current research emphasizes design changes to improve heat transfer and other performance.

Previous studies note a lack of specific recommendations for design improvement, incomplete investigation of the causes of inaccurate results, and insufficient detail of important parameters. This study presents the model setup steps with emphasis on the important details of the heat exchanger. The grid adjustment process and the properties of the incoming oil are described. The impact of turbulence on crude oil and steam temperature changes is considered. The influence of speed on the heat exchange coefficient was also analyzed in detail, and prospects for further optimization were determined. The application of computer modeling in the oil and gas industry is important. It is a key tool for improving the efficiency, security, and sustainability of operations in the industry.

Computer modeling allows you to predict and optimize processes, create accurate virtual models of objects, analyze their security, and research new technologies. It also facilitates economic analysis, staff training, and innovation. As a result, computer simulation improves decisions, reduces risks, and promotes the development of the entire oil and gas industry. It is one of the effective methods of studying physical systems. Often, computer models are easier and more convenient to study, they allow conducting computational experiments, the real setting of which is difficult or can give an unpredictable result. All these aspects together are aimed at a deeper and more detailed understanding of heat exchange processes, which reveals the potential for improving this process in the future.

The main focus in this context is on the fundamental aspects of developing simulation models when using specialized software. The obtained results of the analysis and adjustment allow a deeper understanding of the model configuration process and the prospects for its further optimization. Increasing the flow rate promotes more efficient heat exchange due to the higher velocity of the medium. A linear dependence of the heat distribution along the length of the pipe and the heat transfer coefficient is obtained in the process of modeling.

**Keywords:** computational fluid dynamics, shell-and-tube heat exchanger, energy efficiency, computer modeling, optimizing heat exchange systems, imitative modeling, oil and gas industry, heat transfer coefficient.

### References

1. Kaiser, J. M., Gary, J. H., & Handwerk, G. E. (2007). *Petroleum Refining Technology and Economics*. New York : CRC Press.
2. Fahim, M. A., Al-Sahhaf, T. A., & Elkilani, A. (2010), *Fundamentals of Petroleum Refining*. Amsterdam: Elsevier.
3. Kamalifar, S., Peyghambarzadeh S. M., Azizi, S. & Jamali-Sheini, F. (2023). Experimental study on crude oil fouling in preheat exchangers at different operating conditions. *Thermal Science and Engineering Progress Journal*, 39(1). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101742>.
4. Vafajoo, L., Ganjian, K., & Fattahi, M. (2012). Influence of key parameters on crude oil desalting: An experimental and theoretical study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 90-91, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.04.022>.
5. Martínez-Palou, R., Camacho, R. C., Chávez, B., & Aburto, J. (2013). Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 113, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>.
6. Sass, A., Kummer, A., Ulbert, Z., & Egedy, A. (2021). Failure Analysis of Heat Exchangers with a Valid CFD Simulation. *Periodica Polytechnica Engineering Journal*, 65(4), 536-549. <https://doi.org/10.3311/PPch.17095>.
7. Mohanty, S., Arora, R. (2020). CFD Analysis of a Shell and Tube Heat Exchanger with Single Segmental Baffles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17, 7890-7901.
8. Araavind, S., Athreya, A. (2017). CFD Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger for Pre-heating for Biodiesel. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6, 687-693.

9. Mehedi, T., Kazi, A., Muhammad, Palash, B., Mohammad, R., & Nanjappa, A. (2019). CFD study of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of laminar flow through tube with helical screw tape insert. *Journal of Energy Procedia*, 160, 499-706. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.19>.
10. Kishan, R., Singh, D., & Sharma, A. (2020). CFD Analysis of Heat Exchanger Models Design Using Ansys Fluent. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 11, 1-9. <https://www.doi.org/10.34218/IJMET.11.2.2020.001>.
11. Rao, P. D., Rao, B. N. (2017). CFD Simulation And Validation Through Test Data Of A Double Pipe Counter Flow Heat Exchanger. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8, 818-831.
12. Andriawan, Tanujaya H., Riza, A. (2020). Simulation and Study of Shell and Tube Type Heat Exchangers. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1007, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012197>.
13. Aujla, G. S., Pandey, S., Trivedi, Y., Ghosh, D., Sharma, P., Tyagi, A., Jain, A. (2017). Effectiveness Analysis And Design Of Shell And Tube Heat Exchanger Using Comsol Multiphysics. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8, 777-785.
14. Lelea, A. F., Rönnebecka, T., Rohdea, C., Schmidta, T., Kuznikb, F., & Rucka W. K. L. (2014). Modelling of heat exchangers based on thermochemical material for solar heat storage systems. *Energy Procedia Journal*, 61, 2809-2813.
15. Lee, H. S. (2022). Thermal Design Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells. New Jersey: John Wiley & Sons.
16. Topilnytskyy, P., Romanchuk, V., & Yarmola, T. (2019). Investigation of oil properties from Ukraine Precarpathianoil and gaz region. *Chemistry, technology and application of substances Journal*, 2(2), 102-109. <https://doi.org/10.23939/ctas2019.02.102>.
17. Di Schino A. (2020). Manufacturing and Application of Stainless Steel. Basel
18. Thulukkanam, K. (2016). Heat Exchanger Design Handbook. New York: CRC Press.
19. Reddy, S. S., Dey, T., Haribabu, K., & Krishnakumar, H. (2012). Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers for Sea Water Cooling by COMSOL Multiphysics. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2, 264–270.
20. Comsol, Inc. (2019). COMSOL Multiphysics Reference Manual. Stockholm: COMSOL AB.
21. Lienhard J. (2020). Heat Transfer Handbook. Massachusetts: Phlogiston Press.
22. Adumene, S., Nwaoha, T. C., Ombor, G. P., & Abam, J. T. (2016). Design and Off-Design Performance Evaluation of Heat Exchanger in an Offshore Process Configuration. *Open Access Library Journal*, 3, 1-9. <https://doi.org/10.4236/oalib.1102748>.
23. Maakoul, A., Laknizi, A., Saadeddine, S., Metoui, M., Zaite, A., Meziane, M., & Abdellah, A. (2016). Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles. *Thermal Engineering Journal*, 109, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.067>.
24. Azar, R., Khalilarya, & S., Jafarmadar, S. (2014). Tube bundle replacement for segmental and helical shell and tube heat exchangers: experimental test and economic analysis. *Thermal Engineering Journal*, 62, 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.009>.
25. Pereira, I., Bagajewicz, M. (2021). Global optimization of the design of horizontal shell and tube condensers. *Chemical Engineering Science Journal*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116474>.
26. He, Z., Fang, X., Zhang, Z., & Gao, X. (2016). Numerical investigation on performance comparison of non-Newtonian fluid flow in vertical heat exchangers combined helical baffle with elliptic and circular tubes. *Thermal Engineering Journal*, 100, 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.033>.
27. Kumar, B. N. R., Kirubeil, P., Sundar, A., Singh, L. S., Sousa, M. K. (2018). Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer Journal*, 95, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.020>.