

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

АЛТУХОВА ОЛЬГА ВАСИЛІВНА

УДК: 621.565.94:66.045

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, УДОСКОНАЛЕННЯ ТА
ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика
144 – Теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Канівець Георгій Євдокимович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри "Процеси та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв"

доктор технічних наук, професор
Нікольський Валерій Євгенович,
Український державний хіміко-технологічний університет,
професор кафедри енергетики

Захист відбудеться "27" квітня 2021 р. об "11" годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4.

Факс: +38(056) 745 41 96, e-mail: d0808405-nmetau@metal.nmetau.edu.ua.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України (м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4).

Автореферат розісланий "19" березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.084.05,
канд. техн. наук, доцент

М.С. Чемеринський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Теплообмінні апарати (ТА) є обов'язковим і дуже важливим елементом всіх енергетичних, енерготехнологічних, технологічних, транспортних, комунальних, вугле-, нафто- газодобувних і переробних установок і багатьох інших об'єктів.

Згідно з аналітичним звітом компанії NEXSON GROUP в 2019 році обсяг світового ринку теплообмінників оцінювався в 15,3 мільярдів доларів США. За прогнозами експертів до 2024 року він досягне 20,5 мільярдів доларів, щорічно збільшуючись на 6 відсотків.

Якщо застосувати сучасний інструментарій при проектній оптимізації нових і оптимальній заміні діючих теплообмінних апаратів, то можна зменшити зазначені вище витрати на виробництво теплообмінників в середньому на 20-30%, а іноді і в декілька разів. Відповідно, за найскромнішими підрахунками, при використанні цього інструментарію можливо заощаджувати близько 6 мільярдів доларів щорічно.

Наведені факти свідчать про надзвичайну виробничу необхідність розвитку робіт з оптимізації конструктивних та режимних параметрів теплообмінників.

Проведення цих робіт ускладнюється тим, що всі теплообмінні апарати розрізняються конструкцією, можливими розмірами (типорозмірами), матеріальним виконанням, складом, властивостями і масою теплоносіїв, їх температурними параметрами, процесами тепловіддачі, різноманіттям схем взаємодії потоків середовищ в апаратах і між апаратами, і багатьма іншими факторами.

Відповідно, при оптимізації розмірність оптимізаційної задачі, тобто число можливих альтернативних варіантів теплообмінників, надзвичайно велике, обчислюється багатьма тисячами. При цьому слід враховувати зростання складності математичних моделей і, відповідно, методів оптимізації при підвищенні вимог до точності оптимізаційних розрахунків і глибини пошуку оптимуму.

Пластинчасті теплообмінники (ПТО) показують високу ефективність в порівнянні з традиційними кожухотрубними в багатьох областях у зв'язку з компактністю, меншою металоємністю, простотою обслуговування. У міру вдосконалення цього виду обладнання можлива заміна їм кожухотрубних теплообмінників (КТО) у все більшій кількості випадків.

Тому в даній роботі розглядається актуальне завдання оптимізації конструктивних і режимних параметрів пластинчастих теплообмінників, що застосовуються в різних енергетичних установках.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Результати дисертаційної роботи використовувались у проектах Міністерства освіти (2010 – 2017 рр): «Розробка теоретичних основ створення енергоефективних теплоутилізаційних комплексів на базі високотемпературних агрегатів з використанням когенераційних технологій», №ДР110U001235, «Підвищення енергоефективності систем скидної теплоти скловарних печей на основі моделювання та оптимізації теплообмінного обладнання» №0113U000423, «Розробка енергоефективних комплексних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів високотемпературних енерготехнологічних процесів»

№0115U000523 що виконувалися на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХП".

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є оптимізація конструктивних і режимних параметрів пластинчастих теплообмінників і вдосконалення методів їх розрахунку і оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз класифікацій теплообмінних процесів і пластинчастих теплообмінних апаратів, а також методів їх розрахунку, узагальнених структур розрахунку ПТО, їх ієрархію і типові структури, структур і змісту теплового, гідравлічного, конструктивного, економічного і оптимізаційного розрахунків ПТО різних рівнів точності, вибрати або розробити критерії оцінки ефективності ПТО. При необхідності розробити відсутні методи та моделі.

2. На основі створених структурних основ і модулів теплового, гідравлічного, конструктивного, економічного і оптимізаційного розрахунків ПТО створити програму оптимізації пластинчастих теплообмінників з гофрованими пластинами.

3. Провести оптимізаційний обчислювальний експеримент за допомогою розробленої програми та визначити оптимальні конструктивні та режимні параметри для пластинчастих теплообмінників різних енергетичних установок. Провести порівняння економічної ефективності ПТО і КТО та (по можливості) дати рекомендації щодо ефективних галузей застосування цих апаратів.

4. Оцінити вплив зміни вартості матеріалів та енергії на оптимальні параметри ПТО. Визначити оптимальні швидкості теплоносіїв при нинішніх рівнях цін.

5. Оцінити вплив зміни конструктивних і режимних параметрів на ефективність ПТО. Визначити оптимальний порядок та крок перебору незалежних змінних при проведенні оптимізації.

6. Оцінити вплив точності застосовуваних моделей на результати розрахунку. Визначити, для яких випадків необхідне використання уточнених методів розрахунку.

Об'єкт дослідження – сучасні методи проектування та оптимізації пластинчастого теплообмінного обладнання.

Предмет дослідження – пластинчасті теплообмінники, що використовуються у якості маслоохолоджувачів парових турбін, в системах опалення та інших енергетичних установках.

Методи дослідження.

1. При створенні системи синтезу методів та алгоритмів розрахунку ПТО було використано системний структурно-модульний підхід. У цій роботі він отримав подальший розвиток.

2. У розробленому методі й алгоритмі уточненого розрахунку теплопередачі у системі каналів пластинчастого теплообмінного апарату було використано різноманітні чисельні методи розрахунку систем нелінійних рівнянь.

3. З ціллю отримання більшого ефекту за рахунок розширення області оптимізації ПТО використано новий, фрактальний метод розрахунку теплової ефективності комплексів теплообмінних поверхонь.

4. Інтегруюча технологія наукового дослідження – розрахунковий експеримент – була використана для оцінювання впливу різноманітних факторів на ефективність роботи ПТО, а також для оцінки впливу локальних та загальних похибок розрахунку на похибку результатів розрахунку і оптимізації ПТО.

5. Чисельне CFD 1 та 3-вимірне моделювання виконане для перевірки адекватності створеної методики уточненого інтервального розрахунку пластинчастого теплообмінника.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано використання уточненого інтервального теплового розрахунку в пластинчастому теплообмінному апараті як комплексі теплообмінних поверхонь з використанням фрактального підходу. Це дозволило досягнути підвищення точності результатів теплового розрахунку до 10%. Можливість використання такого підходу підтверджено CFD розрахунками.

2. Вперше встановлено ступінь впливу похибки, допущеної у тепловому та гідравлічному розрахунках теплообмінника, на кінцеві результати його оптимізації. Це є основою доведення необхідності використання уточнених методів розрахунку теплообмінного апарата.

3. Розраховано оптимальні швидкості теплоносіїв у каналах пластинчастого теплообмінника в залежності від рівня цін на електроенергію та метал, та співвідношення між ними. Вперше запропоновано універсальну формулу для визначення оптимальної швидкості води в каналах пластинчастого теплообмінника з урахуванням цих параметрів. Це дозволило досягнути економії при проектуванні теплообмінників на 20 – 30%, а також значно скоротити пошук їх оптимальної конструкції.

4. Вперше встановлено порядок та шаг перебору незалежних змінних, що забезпечує найшвидший пошук екстремуму критерію оптимальності при проектуванні пластинчастих теплообмінників, що дозволило значно скоротити розмірність задачі оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Визначено оптимальні конструкції та режимні параметри пластинчастих теплообмінників для ряду потужностей різних енергетичних установок: маслоохолоджувачі парових турбін з витратою мастила 10-250 кг/с; теплообмінники системи опалення потужностями від 100 до 2000 кВт; регенератори понадкритичного CO₂ циклу потужностями 1-15 МВт; підігрівачі повітря системи знеліднення газотурбінного циклу потужностями 1-20 МВт.

2. Розроблений програмний продукт СПОТО для розрахунку і оптимізації ПТО може бути включений в системи автоматизованого проектування обладнання, він дозволяє проводити розрахункові експерименти та може бути використаний у наукових дослідженнях для пошуку шляхів подальшого удосконалення ПТО. У ньому вперше забезпечено можливість оцінки ефективності ПТО не лише на етапі проектування, але й в процесі експлуатації, модернізації, реконструкції, тобто на всіх етапах життєвого циклу.

3. Результати роботи можуть бути використані при викладанні сучасних IT-методів проектування та оптимізації різноманітного теплообмінного обладнання.

Особистий внесок автора.

Виконані дослідження та отримані результати є персональним досягненням здобувача. Безпосередній внесок автора у науковій роботі, а також виконаний у співавторстві, представлено у переліку робіт, опублікованих по темі дисертації.

У роботах [7-9, 12] автором розроблено алгоритм розрахунку та оптимізації ПТО. У роботах [10, 13, 15] автором розроблено уточнену методику розрахунку теплообміну у пластинчастому теплообмінному апараті. У роботі [13] автором сформовано принципи синтезу алгоритмів та програм розрахунку для пластинчастих теплообмінників. Робота [1] виконана здобувачкою самостійно. У роботі [2] здобувачкою зроблено опис створеної нею системи синтезу алгоритмів та програм ОКПТО та аналіз подальших шляхів її розвитку. У роботі [3] проаналізовано специфіку пластинчастих теплообмінників при створенні систем розрахунку. У роботі [16] викладено створені автором основи функціональної класифікації пластинчастих теплообмінників, яку було закладено в основу створеної системи оптимізації. У роботах [4, 5, 11, 17, 18, 19] здобувачкою проведено комплексні оптимізаційні розрахункові експерименти для різних енергетичних установок (маслоохолоджувачі парової турбіни, теплообмінники системи опалення, підігрівачі повітря газотурбінної установки та регенератори понадкритичного CO₂ циклу) та виконано аналіз отриманих результатів, вироблено рекомендації щодо оптимальних швидкостей теплоносіїв, ранжування незалежних змінних при проведенні оптимізації, виконано аналіз впливу похибки окремих розрахунків на кінцеві результати оптимізації. У роботах [20-22] здобувачкою виконано проектну оптимізацію теплообмінного обладнання у газотурбінному циклі із системою знеліднення, циклі теплового насоса та понадкритичному CO₂ циклі.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи представлені доповідями на конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 2011–19; «Енергетика. Екологія. Людина», 2011 р; «Математические методы в технике и технологиях», 2012 р; «Муніципальна енергетика: Проблеми, рішення», 2013 р; «ASME 2019 Gas Turbine India Conference», 2019 р; «IIR Rankine Conference», 2020 р; «ASME Turbo Expo», 2020 р.

Публікації.

По темі дисертаційної роботи автором опубліковано 22 друкованих роботи, з них 6 статей у збірниках наукових праць, 16 доповідей та тез доповідей на конференціях.

Структура дисертації.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел, що включає 102 найменування, додатків.

Основний матеріал викладено на 165 сторінках машинописного тексту, містить 11 таблиць та 30 рисунків.

Робота виконувалась на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано ціль та задачі дослідження, обрано об'єкт та предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У *першому розділі* наведено огляд пластинчастого теплообмінного обладнання та методів його розрахунків. Проаналізовано основні конструкції пластинчастих теплообмінників. Приклад пластинчастого теплообмінника та гофрованих пластин, що його складають, наведено на рис. 1.

Розглянуто узагальнені структури розрахунків та системи конструкторських, теплових, гідравлічних та економічних розрахунків. Обрано найбільш відповідні критерії оптимальності теплообмінників. Проведено аналіз існуючих методів оптимізації, а також виконано огляд існуючих програмних продуктів. На основі цього розділу сформульовані цілі та задачі дисертації.

У *другому розділі* викладені принципи створення синтезаторів засобів розрахунку та оптимізації ПТО (надалі просто синтезатори). Це алгоритми та програми, що дозволяють генерувати окремі, вузькоспеціалізовані програмні продукти для виконання конкретних розрахунків певних видів обладнання. Таким чином, синтезатор являє собою деякий універсальний алгоритм та компілятор (при реалізації), що об'єднує та узгоджує розрахунки у широкій області об'єктів та задач.

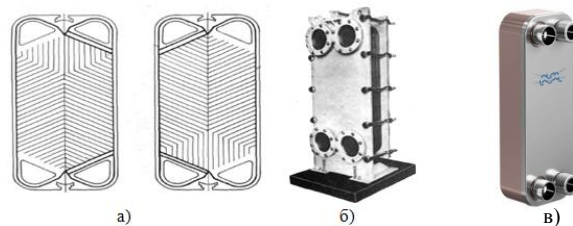


Рисунок 1 – Схеми гофрованих пластин (а) та загальний вигляд розбірного (б) та паяного (в) пластинчастого теплообмінного апарату.

У цьому розділі наводиться функціональна класифікація пластинчастих теплообмінників різних конструкцій (див. далі), а також їх розрахунків.

Ознаки теплообмінних об'єктів згідно функціональної класифікації:

1 група – **функціональні ознаки:**

- 1) спосіб передання тепла;
- 2) поєднання процесів теплообміну в апараті;
- 3) характер теплового режиму;

2 група – **конструктивні ознаки:**

- 4) форма теплообмінного модуля;
- 5) тип поверхні теплопередачі;
- 6) конструкція апарата;
- 7) структура теплообмінного пристрою;
- 8) конструктивна компоновка апаратів у теплообміннику;
- 9) просторове розташування апаратів;

3 група – **ознаки схем течій середовищ:**

- 10) схема течії середовищ в елементі;

- 11) схема течії середовищ в апараті;
- 12) схема течії середовищ у теплообміннику.

Ця класифікація дозволяє чітко позначити за допомогою класифікаційних шифрів однозначно ідентифікувати будь-який з видів пластинчастих теплообмінників з усієї різноманітності можливих. Саме така класифікація, побудована на функціональних ознаках обладнання, необхідна для побудови синтезаторів засобів розрахунку та оптимізації теплообмінників та складає їх структурну основу.

Наявність такої ідентифікації спрощує процес вибору складових (т. з. модулів, елементів) основних видів розрахунку теплообмінних апаратів: конструкторського (основні розміри живого перетину по ходу теплоносіїв, основні розміри та вага складових апарату та ін.), теплового (коефіцієнтів тепловіддачі, термічного опору, коефіцієнтів теплопередачі у перетині теплообмінної поверхні і т.п.), гідравлічного (лінійні та місцеві гідравлічні опори і т.п.), економічного (елементи розрахунку капітальних вкладень в апарат і т. п.).

За рахунок цього істотно спрощується створення інформаційної бази системи синтезу алгоритмів розрахунку пластинчастого теплообмінного обладнання.

Синтезатори алгоритмів і програм розрахунку і оптимізації теплообмінного обладнання розроблені на основі системного структурно-модульного підходу. Застосування цього підходу дозволяє досягти ряду переваг. Серед них широка гама різновидів розрахунку, а також можливість розвитку алгоритму за допомогою включення нових модулів без зміни загальної його структури; можливість створювати такі алгоритми і програми, які можна супроводжувати і модифікувати без участі авторів, що досягається за рахунок зрозумілості, доступності алгоритму, і спрощує їх включення в САПР і АСНД; можливість агрегування – об'єднання елементів алгоритмів в єдину систему. При цьому забезпечується рішення дворівневого завдання: на верхньому рівні проводиться пошук оптимальних режимних параметрів (окремого елемента або системи в цілому); на нижньому рівні – пошук оптимальних конструктивних параметрів (стосовно до певного елемента системи). Окремі складові елементи алгоритму можна використовувати також як самостійні алгоритми.

Алгоритм проектної оптимізації та оптимальної заміни пластинчастого теплообмінника приведений на рис. 3.

Третій розділ присвячено створенню системи змінних модулів для зазначених вище структур конструкторського, теплового, гідравлічного та економічного розрахунків.

Розроблені модулі легко агрегуються у існуючі системи розрахунку теплообмінного обладнання (кожухотрубчастих теплообмінників, апаратів повітряного охолодження та ін.).

Ядро цих модулів – традиційний тепловий та гідравлічний розрахунки пластинчастих теплообмінних апаратів. Також в алгоритмі використовується метод розрахунку регулярних комплексів теплообмінників, розроблений Канівцем Г.Є.

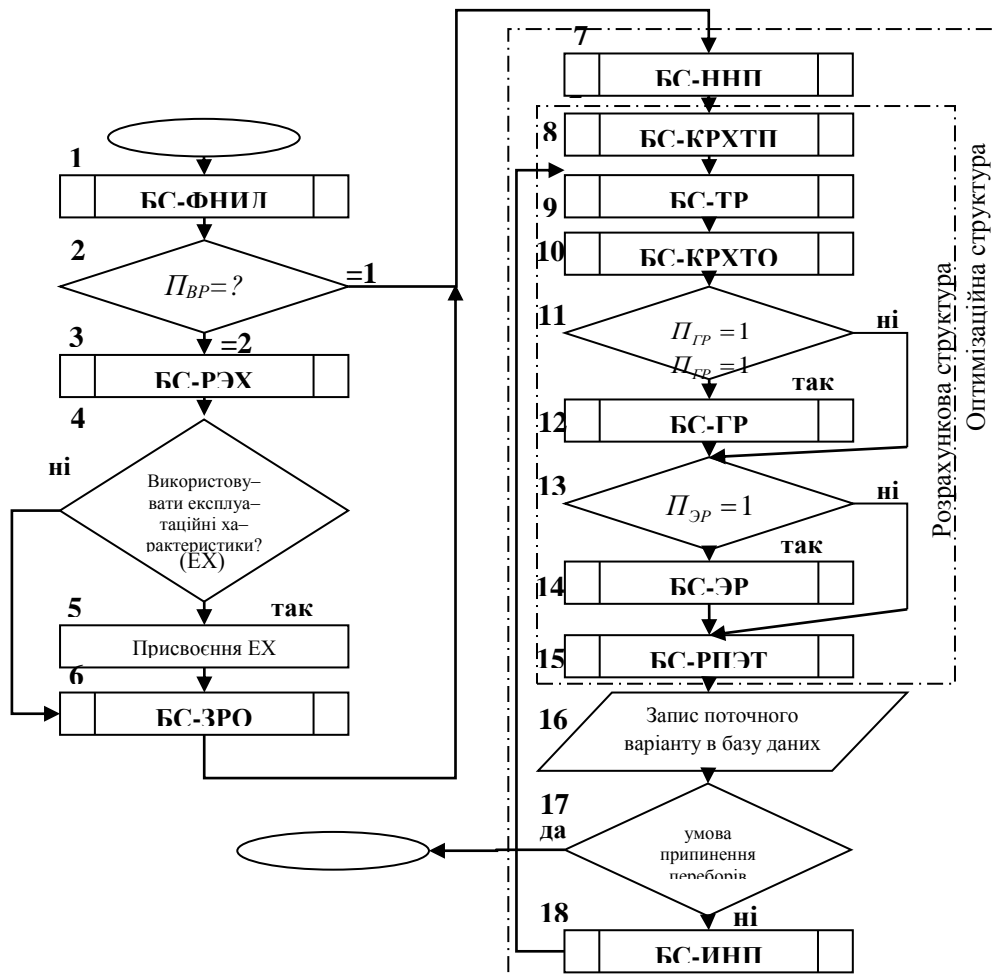


Рисунок 3 – Алгоритм проектної оптимізації та оптимальної заміни ПТО

Далі викладено необхідні для проведення теплових розрахунків дані про ефективності теплопередачі E та інших величинах для будь-яких схем течії теплоносіїв у теплообмінниках, від найпростіших до складних.

Основна ідея фрактального розрахунку полягає у послідовному формуванні ефективностей теплообмінників за допомогою поетапного об'єднання окремих теплообмінних поверхонь у пари, ряди та комплекси. Декотрі основні залежності (але далеко не всі, використані у алгоритмі) наведено нижче.

Пара – послідовне, паралельне чи перехресне з'єднання двох теплообмінних поверхонь (ТП). Кожна з цих поверхонь ТП1 та ТП2 у свою чергу може складатися з елементів, пар, рядів та комплексів, що відрізняються один від одного декількома факторами: схемою течії середовищ СТ, типорозміром ТР, конструкцією, ефективністю процесів теплопереносу. З них самим простим випадком є пара елементів. У загальному випадку теплообмінні поверхні, що входять у пару, відрізняються значеннями ефективності теплопередачі E_1 та E_2 . Пари ТП є виродженнями ряду ТП при кількості ТП у ряді $n_p=2$. Існують також пари однакових ТП як виродження ряду однакових.

Математичною моделлю процесу теплопередачі у парі ТП є система рівнянь теплового балансу та теплопередачі у вигляді

$$A_n = \frac{1}{R_n} = \frac{G_{on} c_{on} \eta_{non}}{G_{en} c_{en} \eta_{nen}} = \frac{\delta t_{en}}{\delta t_{on}} = \frac{t_{en} - t_{enn}}{t_{onn} - t_{окн}},$$

$$E_n = \frac{P_n}{A_n} = P_n R_n = \frac{t_{onn} - t_{окн}}{t_{onn} - t_{enn}} = \frac{\delta t_{on}}{\Delta t_{макс.н}} = \frac{Q_n}{Q_{макс.н}} = \frac{k_n F_n}{G_{on} c_{on} \eta_{non}} \cdot \frac{\Delta t_{ср.н}}{\Delta t_{макс.н}}.$$

Тут індекс n позначає належність до пари ТП.

Ефективність теплопередачі пари теплообмінних поверхонь E_p залежить від типу пари. Наприклад, послідовне з'єднання різних ТП, загальна протитечія (протиточне з'єднання ТП середовищами)

$$E_n = \frac{E_1 + E_2 - E_1 E_2 (A_2 + 1)}{1 - E_1 E_2 A_2}.$$

Послідовне з'єднання однакових ТП, загальний протиток (протиточне з'єднання ТП середовищами)

$$E_n = \frac{2E - E^2 (A + 1)}{1 - E^2 A}.$$

Ряд – послідовно-паралельне з'єднання двох або більше теплообмінних поверхонь (елементів, пар елементів, рядів або комплексів), а також їх різноманітних поєднань. Математична модель процесу теплопередачі у ряді аналогічна такій у парі.

Для розрахунку ефективності теплопередачі E_p рядів з n_p теплопередаючих поверхонь ТП, що складаються, наприклад, з елементів, використовують наступні формули. Послідовне з'єднання різних ТП (теплообмінними поверхнями можуть бути елементи, пари, ряди та комплекси ТП), загальний протиток (прямоточне з'єднання ТП середовищами),

$$E_p = \sum_{i=1}^{i=n_p} E_i \prod_{j=1}^{j=i-1} [1 - E_j (A_j + 1)].$$

Послідовне з'єднання різних ТП, загальний протиток

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=n_p} \frac{E_i}{1 - E_i} \prod_{j=1}^{j=i-1} \frac{1 - E_j}{1 - E_j A_j}}{1 + \sum_{i=1}^{i=n_p} \frac{E_i A_i}{1 - E_i A_i} \prod_{j=1}^{j=i-1} \frac{1 - E_j}{1 - E_j A_j}}.$$

Паралельне з'єднання різних ТП, загальний протиток, діляться обидва середовища

$$E_p = \sum_{i=1}^{i=n_p} m_{oi} E_i,$$

де $m_{o1}, \dots, m_{oi}, \dots, m_{onp}$ – коефіцієнти розподілу середовища О ($\sum_{i=1}^{i=n_p} m_{oi} = 1$).

Загальне перехресне з'єднання різних ТП у ряді, ділиться середовище, що віддає тепло

$$E_p = \sum_{i=1}^{i=n_p} m_{oi} E_i \prod_{k=1}^{k=i-1} (1 - E_k A_k).$$

Комплекси – регулярне (послідовно-паралельне або перехресне) або нерегулярне (довільне) з'єднання трьох або більше теплообмінних поверхонь ТП (елементів, пар, рядів або комплексів), а також будь-якої їх комбінації.

На практиці найбільш розповсюджені регулярні комплекси 00000, 00010 та частково – комплекси 00100, 00110, 01000, 01010 (рис. 4).

Ефективність теплопередачі комплексів 0 (00000, 00010) та 1 (00100, 00110)

$$E_k = \frac{1 - (1 - E_p \cdot A_p)^{\frac{U_o}{U_B}}}{\frac{U_o}{U_B} \cdot A_p}$$

Ефективність теплопередачі комплексів 1 (01000, 01010)

$$E_k = 1 - (1 - E_p)^{\frac{U_B}{U_o}}$$

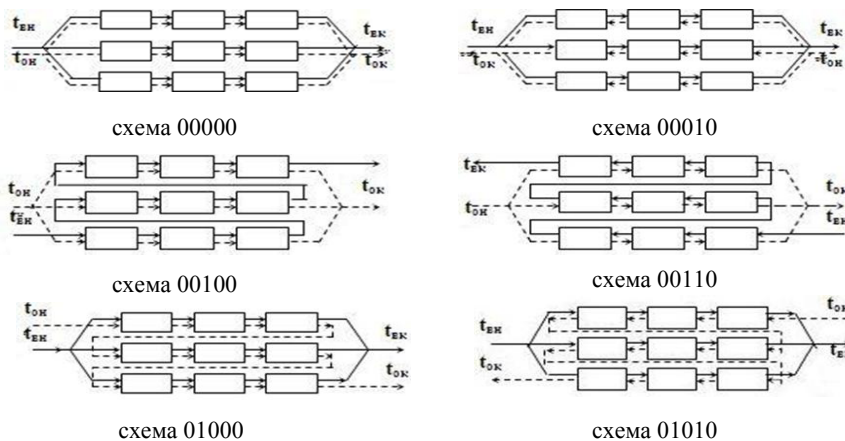


Рисунок 4 – Схеми регулярних комплексів

У розділі також приводяться вперше розроблені автором принципи формування топологій схем течії середовищ у пластинчастих теплообмінних апаратах та запропоновано нову методику уточненого розрахунку пластинчастого теплообмінного апарату як системи теплообмінних елементів, з'єднаних складною схемою течії середовищ. Приклад такої схеми течії середовищ можна побачити на рис. 5.

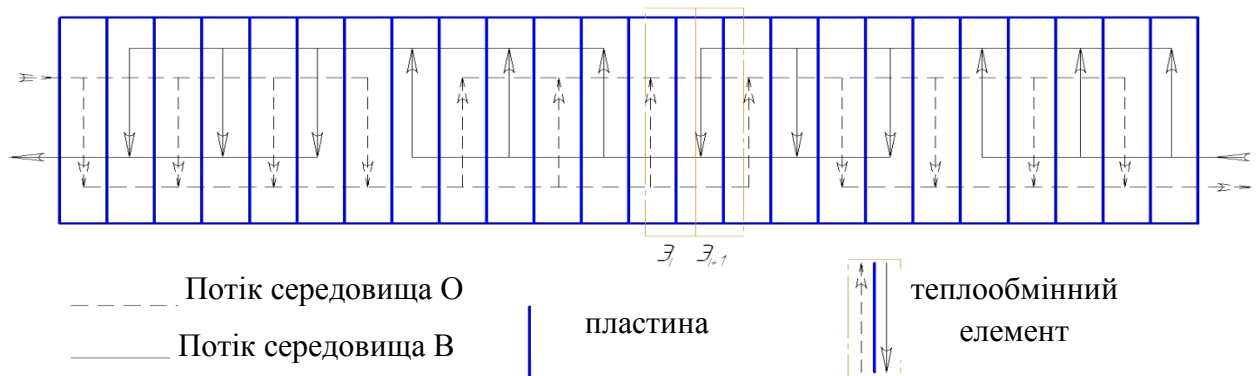
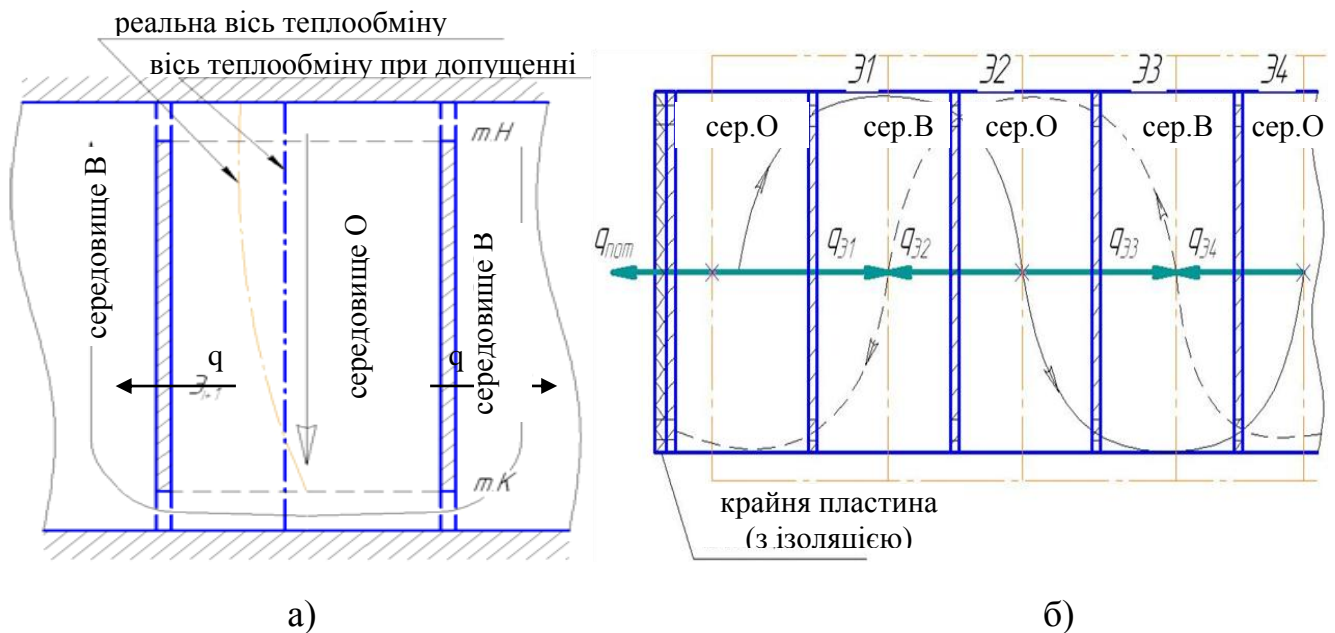


Рисунок 5 – Приклад схеми течії середовищ в пластинчастому теплообмінному апараті та основні його елементи

Задачею створення уточненої методики є створення моделі, що дозволяє **автоматично** визначати топологію **будь-якого** пластинчастого теплообмінного апарату та формувати алгоритм розрахунку саме для неї.

Можна умовно представити весь теплообмінний апарат (ТА) як набір декотрої кількості самостійних умовних теплообмінних апаратів, що складаються з однієї пластини та двох потоків середовищ, що її омивають. Такий умовний теплообмінний апарат ми назвемо теплообмінним елементом. Кожний з них буде мати елементарну схему течії: протитечія чи прямотечія. Знаючи кожну з цих елементарних схем, а також послідовність їх з'єднання, можна провести уточнений розрахунок усього апарату.

Теплообмінний елемент (ТЕ) – це частина ТА, що включає пластину та частини потоків середовищ, що віддає та отримує тепло, які омивають цю пластину, при цьому вони розділені таким чином, що через межу теплообмінного елемента передача тепла відсутня (рис. 6а).



а)

б)

Рисунок 6 – Модель передачі теплоти у теплообмінних елементах (а) та теплові потоки в елементах (б)

В рамках цього дисертаційного дослідження розроблено моделі двох рівнів:
 – при незмінному коефіцієнті теплопередачі по довжині поверхні теплообміну,
 – при змінному коефіцієнті теплопередачі з урахуванням залежності властивостей середовищ від температури.

Розрахунок складається з двох частин, що не залежать одна від одної: формування топології схеми течії середовищ (СТС) та безпосередньо розрахунок параметрів потоків по ділянках розбиття.

Для формування топології розроблена універсальна для всіх випадків модель. Для опису будь-якої існуючої схеми течії середовищ у пластинчастому теплообмінному апараті використовується матриця топології, наведена в табл. 1.

Ефективність елемента показує, яка схема течії середовищ у елементі – прямотечія, протитечія чи перехресна течія. Група елементів формується по кожному середовищу окремо, це декотрий набір теплообмінних елементів, при проходженні через які потік середовища у ТА розбивається на паралельні потоки. Приклад формування груп елементів наведено на рис. 7.

Таблиця 1 – Форма матриці топології СТС в ПТА

Найменування величини		Номер елемента								
		1	2	...	i-1	i	i+1	...	N-1	N
Ефективність елемента, $p_i \in [0;1]$										
Група елементів	по гарячому теплоносію, $N_{Oi} = 1,2,\dots$									
	по холодному теплоносію, $N_{Bi} = 1,2,\dots$									
Коефіцієнт розподілу	гарячого теплоносія, $\varphi_{Oi} \in [0;1]$									
	холодного теплоносія, $\varphi_{Bi} \in [0;1]$									

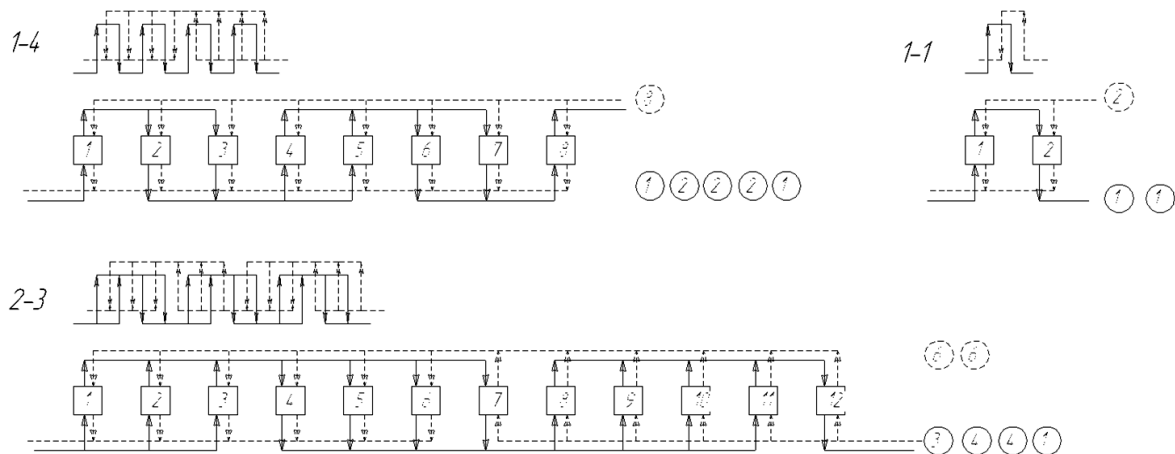


Рисунок 7 – Схеми течії середовищ через елементи (групи елементів)

Коефіцієнт розподілу середовища показує частку загального потоку середовища, що проходить через даний елемент (рис. 6б).

Коефіцієнти розподілу середовищ:

– непарний елемент $\varphi_{B\Delta 1} = \frac{q_{\Delta 1}}{(q_{\Delta 1} + q_{\Delta 2}) \cdot N_{канВ}}$,

– парний елемент $\varphi_{B\Delta 2} = \frac{q_{\Delta 2}}{(q_{\Delta 1} + q_{\Delta 2}) \cdot N_{канВ}}$.

Модель формування топології одна, а визначення параметрів потоків може проводитись по-різному – чисельне рішення системи рівнянь методом послідовних наближень, методом Гаусса-Зейделя чи методом Ньютона на вибір. При цьому формується система рівнянь для кожного теплообмінного елемента з рівнянь:

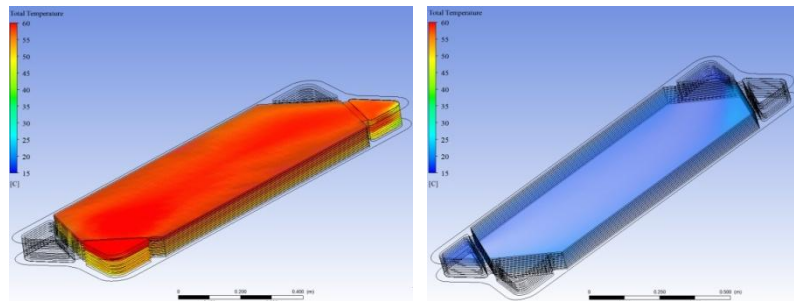
- теплопередачі,
- теплового балансу по гарячому та холодному середовищах,
- коефіцієнту розподілу середовищ гарячого та холодного.

Невідомими в системі рівнянь є

$$x = (t_{OK1}, \dots, t_{OKn\Delta}, t_{BK1}, \dots, t_{BKn\Delta}, \varphi_{O1}, \dots, \varphi_{On\Delta}, \varphi_{B1}, \dots, \varphi_{Bn\Delta})^T.$$

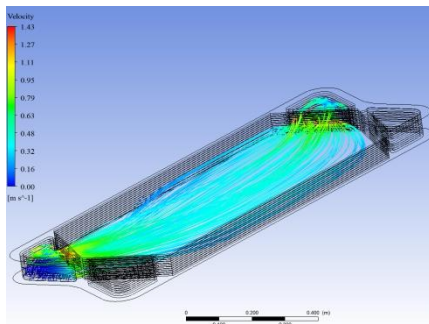
Система рівнянь має вигляд

$$F(x) = \begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = \frac{q_{K1} - q_{O1}}{\min(q_{K1}, q_{O1})} = 0, \\ \dots \\ f_{n\text{Э}}(x_1, \dots, x_n) = \frac{q_{Kn\text{Э}} - q_{On\text{Э}}}{\min(q_{Kn\text{Э}}, q_{On\text{Э}})} = 0, \\ f_{n\text{Э}+1}(x_1, \dots, x_n) = \frac{q_{O1} - q_{B1}}{\min(q_{O1}, q_{B1})} = 0, \\ \dots \\ f_{2n\text{Э}}(x_1, \dots, x_n) = \frac{q_{On\text{Э}} - q_{Bn\text{Э}}}{\min(q_{On\text{Э}}, q_{Bn\text{Э}})} = 0, \\ f_{2n\text{Э}+1}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\varphi_{O1} - \varphi_{O1}(q_K)}{\min(\varphi_{O1}, \varphi_{O1}(q_K))} = 0, \\ \dots \\ f_{3n\text{Э}}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\varphi_{On\text{Э}} - \varphi_{On\text{Э}}(q_K)}{\min(\varphi_{On\text{Э}}, \varphi_{On\text{Э}}(q_K))} = 0, \\ f_{3n\text{Э}+1}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\varphi_{B1} - \varphi_{B1}(q_K)}{\min(\varphi_{B1}, \varphi_{B1}(q_K))} = 0, \\ \dots \\ f_{4n\text{Э}}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\varphi_{Bn\text{Э}} - \varphi_{Bn\text{Э}}(q_K)}{\min(\varphi_{Bn\text{Э}}, \varphi_{Bn\text{Э}}(q_K))} = 0. \end{cases}$$

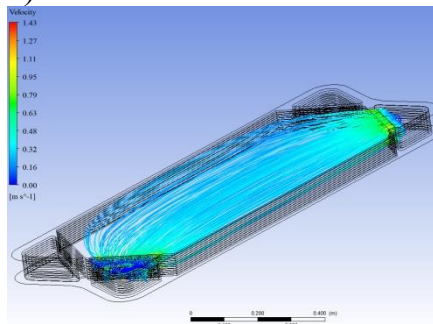


а)

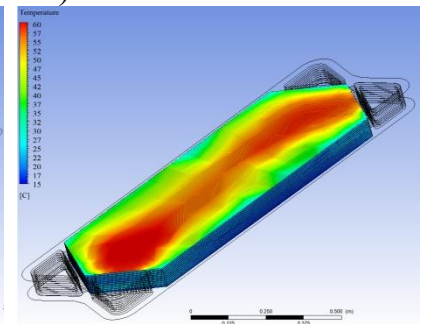
б)



в)



г)



г)

Рисунок 8 – Результати моделювання пластинчастого теплообмінника в 3Д солвері для перевірки точності розрахунку розробленої методики: а) розподіл повних температур гарячого теплоносія (мастило); б) розподіл повних температур холодного теплоносія (вода); в) та г) струйки току холодного та гарячого теплоносіїв відповідно; г) температури поверхонь теплообміну

Також можливе використання фрактального підходу, розробленого Канівцем Г.Є., для скорочення розмірності задачі розрахунку.

Адекватність результатів розробленої методики підтверджено розрахунками у одно- та тривимірному солверах на моделі маслоохолоджувача з 13-ма пластинами Р-0,6 (рис. 8).

Використання уточненої методики розрахунку відкриває ряд можливостей.

1. Найбільш важлива – здешевлення теплообмінників та зниження енергозатрат при їх експлуатації за рахунок зниження необхідного коефіцієнту запасу, що значно покращить результати оптимізації.

2. Можливість проведення нестандартних розрахунків, що потребують поелементного урахування умов теплообміну, а також конструктивних параметрів теплообмінних поверхонь.

3. Попередження потрапляння при розрахунку у зону нереальності роботи апарата (наприклад, коли температура холодного середовища вище, ніж гарячого).

4. Відхід від необхідності введення різноманітних емпіричних коефіцієнтів, можливість використовувати аналітичні рівняння без поправок та обмежень.

У четвертому розділі наводяться рекомендації, вироблені по результатам проведення ряду розрахункових експериментів за допомогою розробленого авторами інструменту – алгоритму ОПТО та написаної по ньому програми СПОТО.

Основні труднощі при проведенні оптимізації теплообмінного обладнання – величезні обсяги обчислень. Проектний розрахунок теплообмінника містить сотні обчислень, а для досить повної оптимізації необхідно проводити десятки, а іноді і сотні тисяч таких розрахунків. Наприклад, при проектній оптимізації пластинчастого маслоохолоджувача турбіни при переборі всього 4 типів пластин кількість тільки реальних варіантів конструкцій теплообмінників складає приблизно 1,35 млн. Банальне скорочення кількості варіантів, що перебираються, знижує ефективність вибраного теплообмінника. Тому для скорочення розмірності задачі оптимізації потребуються обґрунтовані висновки, що дозволять відсікати завідомо неоптимальні варіанти.

У цьому розділі наведено рекомендації по удосконаленню алгоритмів пошуку екстремуму з метою скорочення обсягу розрахунків без суттєвого зниження ефективності теплообмінника, що обирається. У якості об'єктів при проведенні розрахункового експерименту обрано маслоохолоджувачі турбін, теплообмінники внутрішньодомових систем опалення, підігрівачі повітря системи знеліднення газотурбінних установок, регенератори понадкритичного CO₂ циклу.

У ході розрахункового експерименту порівнювались ефективності кожухотрубних та пластинчастих теплообмінників по двох критеріях: приведені витрати, що включають як капітальні вкладення, так і експлуатаційні витрати, та просто капітальні вкладення. Незалежні змінні при проведенні оптимізації: $N_{\text{канО}}$, $N_{\text{канВ}}$ – кількості каналів у пластинчастому теплообмінному апараті по гарячому та холодному середовищам; $U_{\text{О}}$, $U_{\text{В}}$ – кількості рядів апаратів по гарячому і холодному середовищам для заданих регулярних комплексів апаратів; $F_{\text{пл}}$ – площа теплообмінної поверхні пластини; $t_{\text{ВК}}$ – кінцева температура охолоджуючої води.

Всього при проведенні розрахункових експериментів було розраховано

169 511 679 варіантів маслоохолоджувачів та 15 998 368 варіантів теплообмінників системи опалення. Виявлено, що для обраних об'єктів пластинчасті теплообмінники по обраному критерію майже у 2 рази економічніше, ніж кожухотрубчасті.

На основі проведених розрахункових експериментів було вироблено наступні рекомендації.

Рекомендації щодо порядку та кроку перебору незалежних змінних

По ступеню впливу на результати оптимізації вищезазначені незалежні змінні розташувались у наступному порядку:

✓ для маслоохолоджувачів:

– по критерію оптимальності приведені витрати: t_{BK} ; $N_{канO}$; U_B ; $N_{канB}$; U_O ; $F_{пл}$;

– по критерію оптимальності капітальні вкладення: t_{BK} ; $N_{канB}$; $N_{канO}$; U_O ; U_B ; $F_{пл}$;

✓ для теплообмінників системи опалення по критеріям оптимальності приведені витрати та капітальні вкладення результати ранжування співпадають: $F_{пл}$; $N_{канB}$; U_O ; $N_{канO}$; U_B .

Отримані результати дозволяють визначити черговість та крок перебору незалежних змінних при реалізації методів пошуку екстремуму. Чим більше суттєвий вплив незалежної змінної на результати оптимізації, тим більше кроків по ній необхідно зробити при пошуці оптимуму, та навпаки, якщо вплив змінної незначний, можна обмежитись перебором невеликої кількості її значень на останніх етапах пошуку екстремуму цільової функції.

Рекомендації щодо вибору оптимальних швидкостей середовищ

Проектування будь-якого теплообмінника починається з завдання швидкостей теплоносіїв, що обираються у певних діапазонах. Це ж стосується й початкового вибору діапазону швидкостей при проведенні оптимізації. Такі діапазони рекомендовані чисельною літературою та встановлюються до 1 м/с для нев'язких рідин (наприклад, води) і трохи меншою – до 0,4 м/с – для в'язких (наприклад, мастил). Однак з часу, коли було сформульовано ці рекомендації, співвідношення цін металу та енергії на перекачування теплоносіїв змінилося, тому існує необхідність уточнення оптимальних швидкостей теплоносіїв.

В ході проведення розрахункового експерименту встановлено, що для проаналізованих енергетичних установок оптимальна за економічними критеріями оптимальності швидкість води при нинішньому рівні цін приблизно 0,2 м/с та змінюється в діапазоні 0,01–0,5 м/с, мастила – 0,35 м/с (0,1–0,65 м/с), димових газів – 5 м/с, стисненого повітря – 0,5 м/с, CO₂ при 20 МПа – 0,8 м/с, при 7,692 МПа – 0,4 м/с.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що оптимальна швидкість теплоносіїв при нинішніх рівнях цін дещо нижча, ніж рекомендована літературою.

На рис. 9 наведено залежності оптимальних швидкостей теплоносіїв при зміні цін на електроенергію та метал. При зростанні ціни електроенергії оптимальні швидкості теплоносіїв зменшуються, причому для мастила швидше, при збільшенні ціни в 5 разів оптимальні швидкості мастила й води приблизно рівні. При зростанні швидкості в 10 разів оптимальні швидкості декілька більше 0,1 м/с. При зростанні ціни металу оптимальні швидкості теплоносіїв зростають, при зростанні ціни в 10 разів оптимальні швидкості води знаходяться на рівні 0,3 м/с, мастила – 0,6 м/с.

Узагальнивши отримані дані для води, можна рекомендувати наступну

залежність оптимальної її швидкості (в м/с) від цін на метал та електроенергію

$$w_{\text{опт}} = 8,19 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{мет}}}{\rho_{\text{ээ}}} \right)^{0,2},$$

де $\rho_{\text{мет}}$ – ціна матеріалу пластин, у.о./кг; $\rho_{\text{ээ}}$ – ціна електроенергії, у.о./кВт·год.

Отриману залежність можна також використовувати для оцінки оптимальних швидкостей теплоносіїв при використанні для виготовлення теплообмінників дорогих матеріалів (титану, наприклад).

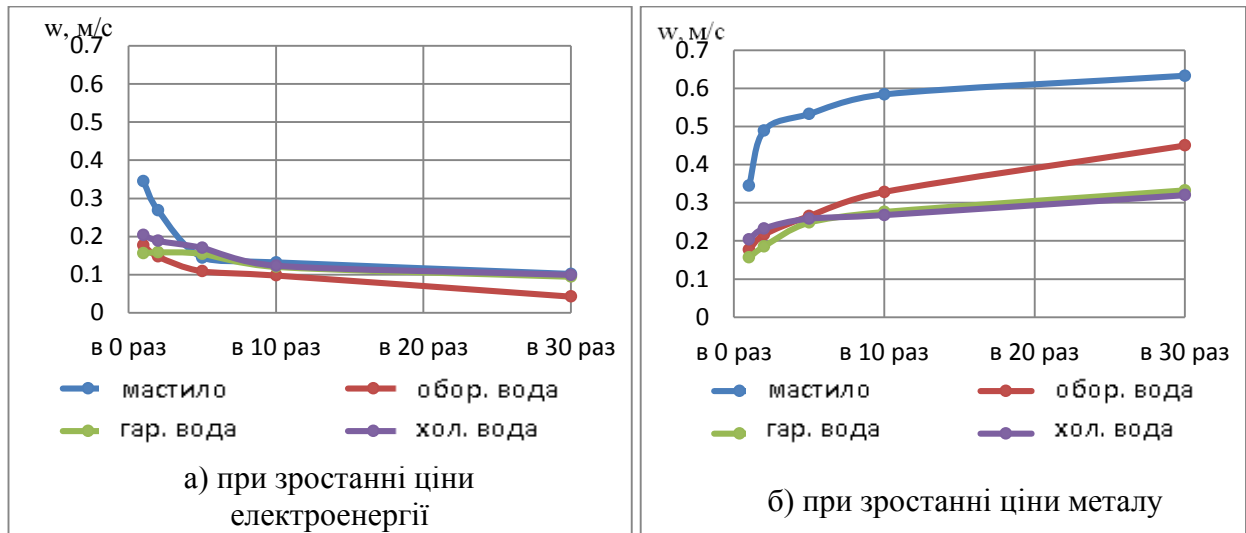


Рисунок 9 – Залежність усереднених оптимальних швидкостей теплоносіїв при зростанні цін а) електроенергії, б) металу

Рекомендації щодо можливості спрощення моделей окремих розрахунків без суттєвої зміни загальної точності розрахунку

Досліджувався вплив похибки розрахунку, яку допущено на етапі розрахунку коефіцієнту теплопередачі k (тепловий розрахунок) та падінь тиску у теплообміннику по обох теплоносіях ΔP_0 та ΔP_B (гідравлічний розрахунок), на кінцеві результати розрахунку теплообмінника та його оптимізації.

При похибці розрахунку коефіцієнту теплопередачі у 1% похибка визначення поверхні теплообміну складає приблизно 2%. При визначенні економічних величин ця похибка більш впливає при розрахунку маслоохолоджувача, ніж теплообмінника системи опалення. Тут відповідно наступний вплив: при визначенні приведених витрат 2,2% / 1,4% відповідно на кожен відсоток похибки; капітальних вкладень 3% / 1,9%; експлуатаційних витрат 1,6% / 0,9%. Залежність похибки розрахунку економічних величин від похибки розрахунку гідравлічних опорів значно менше: десь 1% на кожні 10% похибки ΔP для мастила, і менше 1% на кожна 100% похибки ΔP для води. Похибка знаходження оптимальної швидкості теплоносіїв приблизно 1-8% на кожні 10% похибки розрахунку коефіцієнта теплопередачі або гідравлічного опору. Похибка розрахунку коефіцієнта теплопередачі в 1% призводить до похибки визначення оптимальної кінцевої температури холодного теплоносія в маслоохолоджувачі в 0,2%.

З перерахованих особливостей розрахунку можна зробити висновок, що точність гідравлічного розрахунку впливає на точність основних його результатів в значно меншій мірі, ніж точність теплового розрахунку. Отже, при уточненні моделі розрахунку теплообмінника слід приділити основну увагу саме тепловим розрахунками. Крім того, кінцева похибка розрахунку значно більше для маслоохолоджувачів, що, ймовірно, пов'язано зі значним впливом зміни температури на теплофізичні характеристики мастила. Тому для розрахунку цього обладнання варто застосовувати більш точні моделі.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання: оптимізації пластинчастих теплообмінників енергетичних установок і вдосконаленню методів їх розрахунку і оптимізації. Під час роботи над дисертацією вирішено наступні задачі:

1. Вперше розроблено методику автоматичного інтервального розрахунку пластинчастого теплообмінного апарату як комплексу теплообмінних поверхонь з використанням фрактального підходу. Ця методика дозволяє досягти підвищення точності теплового розрахунку на 3-10%, особливо для теплообмінників з невеликою кількістю пластин. Методика повністю автоматична і може бути використана у програмах оптимізації пластинчастих теплообмінників.

2. Створено програму оптимізації конструктивних і режимних параметрів пластинчастого теплообмінного обладнання для різних задач розрахунку, типів пластинчастих теплообмінників, з можливістю використання моделей різної точності. Вона дозволила провести розрахункові експерименти та може надалі використовуватися в дослідницькій та інженерній діяльності.

3. Проведено комплексний оптимізаційний розрахунковий експеримент для маслоохолоджувачів турбін з витратою мастила 10-250 кг/с, теплообмінників системи опалення потужністю 100-2000 кВт, регенераторів понадкритичного CO₂ циклу потужністю 1-15 МВт, підігрівачів повітря системи знеліднення газової турбіни потужністю 1-20 МВт. Рекомендовано оптимальні конструктивні та режимні параметри для цього обладнання. Встановлено, що пластинчасті теплообмінники ефективніше кожухотрубних по економічних критеріях для всіх діапазонів потужностей вищезазначених установок.

4. Визначено актуальні щодо сучасного рівня цін на метал та енергоносії оптимальні по економічним критеріям ефективності швидкості теплоносіїв в каналах пластинчастих теплообмінників розглянутих енергетичних установок, ці рівні швидкостей значно нижчі, ніж вважалося досі, і становлять 0,2 м/с для води, 0,35 м/с для мастила, 5 м/с для димових газів, 0,5 м/с для стисненого повітря, 0,8 м/с для CO₂ при 20 МПа, 0,4 м/с для CO₂ при 7,692 МПа. Встановлено, як зміняться оптимальні швидкості (води та мастила) при зростанні цін на метал та/або електроенергію. Рекомендовано рівняння для визначення оптимальної швидкості води у залежності від цін на метал та енергію, воно може також бути використане для розрахунку оптимальної швидкості при використанні дорогих металів.

5. Проведено ранжування незалежних змінних по впливу на результати

оптимізації і надано рекомендації щодо порядку і кроку перебору їх, що дозволяє зменшити розмірність задачі оптимізації, і, відповідно, час її проведення.

6. Вироблено рекомендації щодо необхідності використання уточнених методів розрахунку. Це дозволяє встановлювати, для яких випадків необхідне застосування більш складних інтервальних методів розрахунку, у тому числі розробленого в цій дисертації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Алтухова О.В. Принципы формирования топологий схем тока сред в пластинчатых теплообменных аппаратах химических и других производств. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія.* Харків, 2014. №28 (1071). С.3–11.
2. Каневец Г.Е., Алтухова О.В. Синтезатор алгоритмов и программ ОКПТО-2014. Структура, область применения, дальнейшие пути совершенствования. *Інтегровані технології та енергозбереження.* Харків, 2014. №4. С.130–133.
3. Каневец Г.Е., Алтухова О.В. Принципы создания синтезатора алгоритмов и программ оптимизации пластинчатых теплообменных аппаратов. *Енергосбережение. Енергетика. Енергоаудит.* Харьков, 2014. №12. С. 35–39.
4. Алтухова О.В., Каневец Г.Е. Эффективность пластинчатых теплообменников: комплексный оптимизационный вычислительный эксперимент. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.* Харків, 2017. № 9(1231). С52–56.
5. Каневец Г.Е., Алтухова О.В., Маврич Е.А. Сравнение эффективности кожухотрубчатых и пластинчатых подогревателей конденсата. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.* Харків, 2019. № 1'2019. С39–42.
6. Алтухова О.В., Канівець Г.Є. Оптимальні пластинчасті теплообмінники енергетичних установок. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.* Харків, 2020. № 1(3). С.35–41.
7. Канівець Г. Є., Кошельник О. В., Алтухова О. В., Суїма С. Д. Розробка алгоритму та написання програми оптимізації пластинчастих теплообмінників. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. ХІХ міжнар. наук.-практ. конф., Ч.І (м. Харків, 01-03 черв. 2011 р.).* Харків, 2011. С. 240.
8. Г. Е. Каневец, А. В. Кошельник, О. В. Алтухова, С. Д. Суїма, Л. М. Коваленко. Разработка алгоритма оптимизационного расчета пластинчатых теплообменников на основе структурно-модульного подхода. *Енергетика. Екологія. Людина: наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. Київ, 2011. С.126–132.*
9. Г. Е. Каневец, А. В. Кошельник, С. Д. Суїма, О. В. Алтухова. Повышение эффективности работы пластинчатых теплообменников путем оптимизации конструктивных и режимных параметров. *Енергетика. Екологія. Людина: наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. Київ, 2011. С.133–138.*
10. Алтухова О.В., Канівець Г.Є. Структура й математична модель синтезу топології схеми току теплоносіїв у пластинчастих теплообмінних апаратах // *Інформаційні технології: наука, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. ХХ міжнар. наук.-практ.*

- конф., Ч.І (м. Харків, 15-17 травня 2012 р.). Харків, 2012. С.230.
11. Канівець Г.Є., Суїма С.Д., Кошельник О.В., Алтухова О.В. Розрахунковий експеримент при оптимізації пластинчастого теплообмінника. *Інформаційні технології: наука, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф., Ч.І (м. Харків, 15-17 травня 2012 р.). Харків, 2012. С.259.
12. Каневец Г. Е., Алтухова О. В., Суима С. Д. Пилотный синтезатор средств оптимизации промышленных пластинчатых теплообменников. *Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25*: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 10. Секция 12. Волгоград, 2012; Харьков, 2012. С.50–53.
13. Алтухова О.В., Канівець Г.Є. Методика уточненого розрахунку пластинчастого теплообмінного апарату на основі фрактального підходу. *Інформаційні тех.нології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф., Ч.І (м. Харків, 29-31 травня 2013 р.). Харків, 2013. С.261.
14. Каневец Г.Е., Алтухова О.В. Синтезатор средств оптимизационного вычислительного эксперимента с теплообменным оборудованием различных конструкций и назначения как инструмент повышения эффективности теплообменников муниципальной энергетики. *Муниципальна енергетика: Проблеми, рішення*: п'ята міжнар. наук.-техн. конф., 19-20 грудня 2013р. Миколаїв, 2013. С.103–106.
15. Алтухова О.В., Канівець Г.Є. Універсальна методика автоматичної генерації моделі топології комплексів теплообмінних поверхонь для теплового розрахунку на основі фрактального підходу. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф., Ч. V (м. Харків, 21-23 травня 2014 р.). Харків 2014. С.252.
16. Каневец Г.Е., Алтухова О.В. Функциональная классификация пластинчатых теплообменников как основа для построения синтезаторов систем их расчёта и оптимизации. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф., Ч.І (м. Харків, 20-22 травня 2015 р.). Харків, 2015. С.269.
17. Каневец Г.Е., Алтухова О.В. Исследование влияния изменения независимых переменных на результаты оптимизации пластинчатых теплообменников. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф., Ч.І (м. Харків, 18-20 травня 2016 р.). Харків, 2016. С.260.
18. Алтухова О.В., Каневец Г.Е. Рекомендации по выбору оптимальных скоростей сред в пластинчатых теплообменниках. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017 р.: у 4 ч. Ч.І.– Харків, 2017. С.244.
19. Алтухова О.В., Каневец Г.Е. Влияние погрешности отдельных расчётов на итоговые результаты расчёта и оптимизации пластинчатого теплообменника. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017 р.: у 4 ч. Ч.І. Харків, 2017. С.243.
20. Nishit Mehta, Olga Altukhova, Abdul Nassar, Leonid Moroz. An Integral Approach to Designing of an Optimized and Reliable Anti-icing System under Off-Design Operating Regimes in a Gas Turbine. *ASME 2019 Gas Turbine India Conference*. Indian Institute of

Technology Madras, Chennai, India. December 5-6, 2019.

21. Moroz L., Pastrikakis V., Yevlakhov V., Altukhova O., Hoisan S. Accurate modeling of heat pump cycles with steam injection in off-design regimes utilizing an integrated approach. *Refrigeration Science and Technology, IIR Rankine Conference 2020*, 2020-July. P.358–372.

22. Leonid Moroz, Maksym Burlaka, Tishun Zhang, Olga Altukhova. Application of digital twin concept for supercritical CO₂ off-design performance and operation analyses. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020. Turbomachinery Technical Conference and Exposition. GT2020*. June 22-26, 2020, London, England, 2020.

АНОТАЦІЯ

Алтухова О.В. Математичне моделювання, удосконалення та оптимізація пластинчастих теплообмінників. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Національний технічний університет "ХПІ", Харків, спеціалізована вчена рада Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України, Дніпро, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання: оптимізація пластинчастих теплообмінників і вдосконалення методів їх розрахунку і оптимізації. У дисертації запропоновано нову методику автоматичного інтервального розрахунку пластинчастого теплообмінного апарату як комплексу теплообмінних поверхонь з використанням фрактального підходу. Ця методика дозволяє досягти підвищення точності теплового розрахунку до 10%, особливо для теплообмінників з невеликою кількістю пластин. Методика повністю автоматична і може бути використана у програмах оптимізації пластинчастих теплообмінників. Створено програму оптимізації пластинчастого теплообмінного обладнання для різних задач розрахунку, типів пластинчастих теплообмінників, з можливістю використання моделей різної точності. Проведено комплексний оптимізаційний розрахунковий експеримент для маслоохолоджувачів турбін з витратою мастила 10-250 кг/с, теплообмінників системи опалення потужністю 100-2000 кВт, регенераторів понадкритичного CO₂ циклу потужністю 1-15 МВт, підігрівачів повітря системи знеліднення газової турбіни потужністю 1-20 МВт. Рекомендовано оптимальні конструктивні та режимні параметри для цього обладнання. Встановлено, що пластинчасті теплообмінники ефективніше кожухотрубних по економічних критеріях для всіх діапазонів потужностей вищезазначених установок. Визначено актуальні щодо сучасного рівня цін на метал та енергоносії швидкості теплоносіїв (води та мастила) в каналах пластинчастих теплообмінників, ці рівні швидкостей значно нижчі, ніж вважалося досі, і становлять 0,2 м/с для води та 0,35 м/с для мастила. Встановлено, як зміняться оптимальні швидкості при зростанні цін на метал або електроенергію. Рекомендоване рівняння для визначення оптимальної швидкості води у залежності від цін на метал та енергію, що може також бути використана для розрахунку оптимальної швидкості при використанні дорогих металів. Проведено ранжування незалежних змінних по впливу на результати

оптимізації і надано рекомендації щодо порядку і кроку перебору їх, що дозволяє зменшити розмірність задачі оптимізації. Вироблено рекомендації щодо необхідності використання уточнених методів розрахунку.

Ключові слова: пластинчасті теплообмінники, оптимізація, моделювання, уточнений інтервальний тепловий розрахунок, маслоохолоджувачі, опалення, понадкритичний CO₂ цикл, газотурбінна установка, оптимальна швидкість теплоносія.

ABSTRACT

O.Altukhova. Mathematical modeling, improvement, and optimization of plate heat exchangers. - Manuscript.

Thesis for submission of a Candidate's degree in technical sciences under specialty 05.14.06 – «Technical Thermal Physics and Industrial Heat-Power Engineering». National Technical University "KhPI", Kharkiv city, the Specialized Scientific Councils – D 08.084.05 of a “National Metallurgical Academy of Ukraine”, Dnipro city, 2021.

The thesis is devoted to the solution of an important scientific and practical task: optimization of plate heat exchangers and improvement of methods of their calculation and optimization. The thesis proposes a new approach for automatic interval calculation of a plate heat exchanger as a complex of heat exchange surfaces using a fractal approach. This approach makes it possible to achieve an increase in the accuracy of the thermal calculation up to 10%, especially for HEXs with a small number of plates. The approach is fully automatic and can be used in plate heat exchanger optimization programs. A program for the optimization of plate heat exchangers has been created for various calculation problems, types of plate heat exchangers, with the possibility to use models of different accuracy. An integrated computational optimization experiment has been done for turbine lube oil coolers with 10-250 kg/s oil flow rate, heat exchangers of a heating system with 100-2000 kW transferred heat, regenerators of a supercritical CO₂ cycle with 1-15 MW power, air heaters for an anti-icing system of 1-20 MW gas turbine. Optimal design and operating parameters for this equipment are recommended. It was found that plate heat exchangers are more efficient than shell-and-tube heat exchangers in terms of economic criteria for all ranges of the above-mentioned installations. The fluids velocities (water and oil) in the channels of plate heat exchangers relevant to the current level of prices for metal and energy have been determined; these velocities are significantly lower than it was believed until now and are 0.2 m/s for water and 0.35 m/s for lubrication oil. It has been established how the optimal velocities will change with an increase in prices for metal or electrical energy. An equation is recommended to determine the optimal water velocity depending on metal and energy prices, and can also be used to calculate the optimal velocity when using expensive metals. The independent variables are ranked in terms of their influence on the optimization results and recommendations are given on the order and step of using them, which leads to reduce the dimension of the optimization problem. Recommendations have been developed on the need to use refined calculation methods.

Keywords: plate heat exchangers, optimization, modeling, refined interval heat calculation, lubrication oil coolers, heating, supercritical CO₂ cycle, gas turbine, optimal fluid velocity.