

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Оптимізація процесів теплообміну в теплообмінних апаратах
поверхневого типу
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на
транспорті
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи ЕЕ2221:



/ Іван ПІЩИК /

Керівник:



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Нормоконтролер:



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



Дніпро – 2024 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Energy and economic processes management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Heat transfer optimization in shell-and-tube heat exchangers

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport

in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and
electromechanics

Done by the student of the group EE2221: / Ivan Pishchyk /

Scientific Supervisor: / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Normative controller: / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

факультет: Управління енергетичними та економічними процесами

Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

ідувач

кафедри ІС

Дмитро БОСІЙ

Дата 14.01.23

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

маїстр з електроенергетики,

електротехніки та електромеханіки

студенту Піщику Івану Андрійовичу

1. Тема роботи: "Оптимізація процесів теплообміну в теплообмінних апаратах поверхневого типу".

Керівник роботи: Потапчук Ірина Юріївна, к.т.н., доцент

затверджую наказом від

" 14 " 09 2023 р. № 885ст

2. Строк подання студентом роботи: 02.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Теплоносії та конструкції теплообмінних апаратів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Огляд проблеми оптимізації процесів теплообміну в теплообмінних апаратах та трубчастих реакторах.

4.2 Верифікація алгоритмів розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах та трубчастих реакторах.

4.3 Алгоритми розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Метод градієнта. 2. Результати розрахунку при використанні методу градієнта. 3. Результати розрахунку при використанні Extr - Н методу. 4. Метод квазілінеаризації. 5. Результати розрахунку при використанні методу квазілінеаризації. 6. Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу. 7. Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу (продовження). 8. Задача оптимального

розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником
 9. Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу (продовження).
 10. Грані задачі оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу.
 11. результати розрахунків оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу.
 12. Задача оптимальної конструкції кожухотрубного теплообмінника.
 13. Задача оптимальної конструкції кожухотрубного теплообмінника (продовження).
 14. Задача оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника (продовження).
 15. Обмеження для задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника.
 16. Обчислення оптимальних значень параметрів кожухотрубного теплообмінника.
 17. Обчислення оптимальних значень геометричних параметрів кожухотрубного теплообмінника.
 18. Варіанти розв'язання задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника.
 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд проблеми процесів теплообміну в теплообмінних апаратах та трубчастих реакторах.	15.09.2023	
2	Алгоритми розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах.	12.11.2023	
3	Задачі в	25.12.2023	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	02.01.2024	
5	Відомлення комісії роботи на засіданні кваліфікаційної	16.01.2024	

Захист

Студент

Іван ШИЧІК

Керівник роботи

Ірина ПОТАП

ч

УК

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 58 сторінок, 3 частини, 2 рисунки, 7 таблиць, 10 використаних джерел.

Об'єкт дослідження - процеси теплообміну в теплообмінних апаратах поверхневого типу.

Мета роботи – оптимізація теплотехнічних параметрів теплообмінних апаратів поверхневого типу.

Методи дослідження - аналітичні методи мінімізації або максимізації цільових функцій та розрахункові методи верифікація алгоритмів оптимізації.

Одержані результати - виконано огляд сучасних моделей та вирішення задач оптимізації теплообмінних апаратів, в тому числі, поверхневого типу. Виконано верифікацію алгоритмів розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах та трубчастих реакторах. Розглянуто задачу оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі, а також задачу оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу та задачу оптимального керування хімічною реакцією в трубчастому реакторі. Розглянуто алгоритми розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах на прикладі задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника та задачі оптимізації теплообмінника з хімічно реагуючим теплоносієм.

Ключові слова: ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ ПОВЕРХНЕВОГО ТИПУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ, АЛГОРИТМ, ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ТА ТРУБЧАСТИХ РЕАКТОРАХ	8
1.1 Сучасні моделі та вирішення задач оптимізації теплообмінних апаратів....	8
1.1.1 Метод градієнта	8
1.1.2 Extr-N Метод.....	12
1.1.3 Метод квазілінійзації**	15
2 ВЕРИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ТА ТРУБЧАСТИХ РЕАКТОРАХ	24
2.1 Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі	24
2.2 Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу.....	25
2.3 Задача оптимального керування хімічною реакцією в трубчастому реакторі	25
3 АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ	38
3.1 Задача оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника	38
3.2 Задача оптимізації теплообмінника з хімічно реагуючим теплоносієм	44
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58

02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ

Зм	Арк	Надрукована	Підпис	Дата				
Розробив	Піщик	Л.С.С.	Л.С.С.	10.07.23	Оптимізація	процесів	Діагн	Архив

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 58 сторінок, 3 частини, 2 рисунки, 7 таблиць, 10 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну в теплообмінних апаратах поверхневого типу.

Мета роботи – оптимізація теплотехнічних параметрів теплообмінних апаратів поверхневого типу.

Методи дослідження – аналітичні методи мінімізації або максимізації цільових функцій та розрахункові методи верифікація алгоритмів оптимізації.

Одержані результати – виконано огляд сучасних моделей та вирішення задач оптимізації теплообмінних апаратів, в тому числі, поверхневого типу. Виконано верифікацію алгоритмів розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах та трубчастих реакторах. Розглянуто задачу оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі, а також задачу оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу та задачу оптимального керування хімічною реакцією в трубчастому реакторі. Розглянуто алгоритми розв'язання задач оптимізації в теплообмінних апаратах на прикладі задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника та задачі оптимізації теплообмінника з хімічно реагуючим теплоносієм.

Ключові слова: ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ ПОВЕРХНЕВОГО ТИПУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ, АЛГОРИТМ, ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ.

ВСТУП

Питання підвищення економічності теплообмінного обладнання та в першу чергу економії палива займали і займають провідне місце в енергетиці.

Широке впровадження процесів регенерації теплоти та інших важливих способів підвищення теплової економічності енергоустановок потребують розробки методів знаходження оптимальних технічних рішень, що забезпечують досягнення максимального ефекту їх функціонування за найменших витрат.

Коли виникла необхідність вирішення задачі визначення оптимальної температури регенеративного підігріву в теплообмінниках живильної води та оптимального його розподілу між підігрівачами, з'явився ряд робіт з термодинамічного аналізу систем регенеративного підігріву.

В практиці оптимізації набули поширення аналітичні методи, засновані на встановленні безпосередніх залежностей критеріїв оптимальності від параметрів, що обчислюються.

В теперішній час однією з актуальних задач сучасної інженерної практики є проблема енерго- та ресурсозбереження.

Для її розв'язання необхідно створювати компактні та ефективні конструкції теплообмінних апаратів.

На практиці достатньо часто зустрічаються специфічні умови роботи теплообмінних апаратів, що ускладнюються процесами тепломасообміну в теплоносіях або іншими експлуатаційними обмеженнями.

Одним з можливих варіантів розв'язання даної задачі може розглядатись алгоритм оптимізації, що містить одночасну оцінку декількох параметрів ефективності роботи теплообмінника.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						7
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ТА ТРУБЧАСТИХ РЕАКТОРАХ

1.1 Сучасні моделі та вирішення задач оптимізації теплообмінних апаратів

Питання підвищення економічності теплообмінного обладнання та в першу чергу економії палива займали і займають провідне місце в енергетиці.

Широке впровадження процесів регенерації теплоти та інших важливих способів підвищення теплової економічності енергоустановок потребують розробки методів знаходження оптимальних технічних рішень, що забезпечують досягнення максимального ефекту їх функціонування за найменших витрат.

Коли виникла необхідність вирішення задачі визначення оптимальної температури регенеративного підігріву в теплообмінниках живильної води та оптимального його розподілу між підігрівачами, з'явився ряд робіт з термодинамічного аналізу систем регенеративного підігріву.

В практиці оптимізації набули поширення аналітичні методи, засновані на встановленні безпосередніх залежностей критеріїв оптимальності від параметрів, що обчислюються.

1.1.1 Метод градієнта

В теперішній час однією з актуальних задач сучасної інженерної практики є проблема енерго- та ресурсозбереження.

Для її розв'язання необхідно створювати компактні та ефективні конструкції теплообмінних апаратів.

На практиці достатньо часто зустрічаються специфічні умови роботи теплообмінних апаратів, що ускладнюються процесами тепломасообміну в теплоносіях або іншими експлуатаційними обмеженнями.

Одним з можливих варіантів розв'язання даної задачі може розглядатись алгоритм оптимізації, що містить одночасну оцінку декількох параметрів ефективності роботи теплообмінника.

Найбільш відомим прямим методом ітераційного розв'язання задач

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

оптимізації є метод градієнта [1].

Розглянемо застосування цього методу на наступному прикладі.

В трубчастому реакторі відбувається хімічна реакція розпаду у вигляді:



Обидві стадії реакції від A до B та від B до C є реакціями першого порядку. Позначимо концентрації реагентів A та B відповідно через x_1 та x_2 , тоді для них є справедливими наступні рівняння рівноваги:

$$\frac{dx_1}{dt} = -k_1 \cdot x_1, \quad x_1(0) = x_{10}, \quad (1.2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = k_1 \cdot x_1 - k_2 \cdot x_2, \quad x_2(0) = x_{20}, \quad (1.3)$$

де t – поздовжня координата реактора, віднесена до швидкості v масової витрати реагентів, через x_{10} та x_{20} позначено початкові концентрації продуктів A та B , константи k_1 та k_2 , що характеризують швидкість реакції (1.1), залежать від температури θ в реакторі наступним чином:

$$k_1 = k_{10} \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot \theta}}, \quad (1.4)$$

$$k_2 = k_{20} \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot \theta}}, \quad (1.5)$$

де k_{10} , k_{20} , E_1 , E_2 та R – константи.

Метою оптимізації є визначення такого розподілу температури $\theta(t)$ вздовж реактора при його заданій довжині L , щоб на виході з реактора, тобто при $T=L/v$, продукт B мав максимальну концентрацію, тобто $x_2(T)$ набуває максимального значення.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таким чином, критерій оптимізації має вигляд:

$$J = -x_2(T) \rightarrow \min.$$

Якщо розглядати температуру θ як змінну керування, тобто

$$u = \theta,$$

то з рівняння (1.2) та рівняння (1.3) з урахуванням рівняння (1.4) та рівняння (1.5) отримаємо:

$$\frac{dx_1}{dt} = -k_{10} \cdot x_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot u}}, \quad x_1(0) = x_{10}, \quad (1.6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -k_{10} \cdot x_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot u}} - k_{20} \cdot x_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot u}}, \quad x_2(0) = x_{20}. \quad (1.7)$$

Система рівнянь, спряжена з рівнянням (1.6) та рівнянням (1.7) разом з кінцевими умовами має вигляд:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = k_{10} \cdot (\psi_1 - \psi_2) \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot u}}, \quad \psi_1(T) = 0,$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = k_{20} \cdot \psi_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot u}}, \quad \psi_2(T) = 1.$$

де ψ_1 та ψ_2 – спряжені змінні.

Поправка Δu^j до функції керування u^j отримується з функції Гамільтона:

$$H = (\psi_2 - \psi_1) \cdot k_{10} \cdot x_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot u}} - \psi_2 \cdot k_{20} \cdot x_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot u}}$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						10
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

в наступному вигляді:

$$\Delta u^j = k^j \cdot \left\{ (\psi_2^j - \psi_1^j) \cdot k_{10} \cdot x_1^j \cdot \frac{E_1}{R \cdot (u^j)^2} \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot u^j}} - \psi_2^j \cdot k_{20} \cdot x_2^j \cdot \frac{E_2}{R \cdot (u^j)^2} \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot u^j}} \right\} \quad (1.8)$$

Для прикладу розрахунку оберемо наступні числові значення:

$$c_{10} = 0,00053 \text{ моль/м}^3;$$

$$c_{20} = 0,00043 \text{ моль/м}^3;$$

$$k_{10} = 0,892 \cdot 10^9 \text{ 1/с};$$

$$k_{20} = 0,768 \cdot 10^{16} \text{ 1/с};$$

$$E_1 = 75420 \text{ Дж/моль};$$

$$E_2 = 125700 \text{ Дж/моль};$$

$$R = 8,38 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)};$$

$$L = 480 \text{ с};$$

$$T_0 = 250 \text{ К}.$$

В якості початкового наближення приймається:

$$u^0(t) = 250 \text{ К} = \text{const.}$$

Умова переривання циклу розрахунку задається наступним чином:

$$|J^{j+1} - J^j| < 10^{-6}.$$

Для розв'язання задач такого типу нераціонально використовувати сталу довжину кроку k^j . Більше того, довжина кроку k^j повинна бути значно зменшена зі збільшенням кількості ітерацій. Тому, довжина кроку k^j спочатку обирається таким чином, щоб визначена з рівняння (1.8) корекція Δu^j задовольняла умові:

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						11
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$\frac{\Delta u^j(0)}{u^j(0)} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{(j+1)^2}.$$

Результати розрахунку, отримані за допомогою цієї довжини кроку, не є повністю задовільними, оскільки після кількох десятків ітерацій для функціонала J досягнуто точність в чотири знаки після коми. Тому розрахунок повторюється для довжини кроку k^* , оптимізованої за допомогою параболічної апроксимації.

Чисельне інтегрування здійснювалось методом Рунге-Кутта четвертого порядку, при цьому довжина кроку для інтегрування приймалась $\Delta t = 5$ с.

Результати розрахунку наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1- Результати розрахунку при використанні методу градієнта

Номер ітерації j	Управління $u^j(0)$, К	Функціонал $J = -x_2^j(T)$, моль/м ³
0	250,0000	-0,0004300514
1	337,5784	-0,0006788232
2	340,2144	-0,0006794245
3	340,7288	-0,0006794351
4	340,7753	-0,0006794355

1.1.2 Extr-H метод

Extr-H метод є певною модифікацією метода градієнта. В Extr-H метод здійснено спробу покращити збіжність метода градієнта в околі мінімального значення J_{min} за рахунок того, що корекція $\Delta u^j(t)$ обирається не пропорційно $\partial H / \partial u^j(t)$, а розраховується безпосередньо з необхідної умови максимуму функції Гамільтона H .

Як і в методі градієнта передбачається, що початкове наближення $u^0(t)$ для керування є заданим.

Для цього початкового наближення, як і для всіх подальших наближень $u^j(t)$, виконується інтегрування диференціальних рівнянь стану системи, а також спряжені їм диференціальні рівняння.

Потім будується функція Гамільтона і з умови:

$$\frac{\partial H}{\partial u^j(t)} = 0 \quad (1.9)$$

визначається управління $u^{*j}(t)$.

Поправка $\Delta u^j(t)$ тоді визначається наступним чином:

$$\Delta u^j(t) = u^{*j}(t) - u^j(t),$$

і, відповідно, формулою:

$$\Delta u^j(t) = k^j \cdot [u^{*j}(t) - u^j(t)], \quad k^j \leq 1,$$

якщо величина $\Delta u^j(t)$ набуває надто великих значень.

Для скорегованого управління:

$$u^{j+1}(t) = u^j(t) + \Delta u^j(t)$$

визначається

$$u^{j+1}(t) = k^j \cdot u^{*j}(t) + (1 - k^j) \cdot u^j(t).$$

Подальші розрахунки виконуються так само, як і в методі градієнта. Це означає, що для $j=0, 1, 2, \dots$ ітерації виконуються до тих пір, поки не буде виконано умову, задану, наприклад, у вигляді:

$$|J^{j+1} - J^j| < \varepsilon.$$

Певна складність застосування Extr-Н методу полягає в тому, що досить часто з рівняння (1.9) неможливо виразити в аналітичному вигляді керування $u^{*j}(t)$ і вже на цьому етапі потрібно починати ітераційний процес.

Саме цим можна пояснити той факт, що цей метод використовується відносно нечасто.

Для того, щоб мати можливість порівняти ефективність даного методу з методом градієнта, він застосовується для розв'язання задачі про оптимальний розподіл температури в трубчастому реакторі, розглянуту вище.

При використанні оптимізації довжини кроку з використанням параболічної апроксимації були отримані результати, наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку при використанні Extr-Н методу

Номер ітерації j	Оптимальна довжина кроку k^j	Управління $u^j(0)$, К	Функціонал $J = -x_2^j(T)$, моль/м ³
0	-	250,0000	-0,0004300514
1	0,737493	337,5795	-0,0006788237
2	0,859126	340,6968	-0,0006793996
3	0,335069	340,5839	-0,0006794338
4	0,838949	340,8089	-0,0006794353

З таблиці 1.2 видно, що результати розрахунку, наведені в ній, несуттєво відрізняються від результатів розрахунку, наведених в таблиці 1.1.

Проте, час розрахунку, необхідний для чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь, при однаковій для обох методів кількості ітерацій та однаковій довжині кроку у випадку застосування Extr-Н методу є дещо меншим в порівнянні із застосуванням методу градієнта.

Причиною цього є те, що в розглянутому прикладі u^j виражається з формули (1.9) аналітичним шляхом:

$$u^{*j}(t) = \frac{E_1 - E_2}{R} \cdot \ln \left[\frac{\psi_2^j(t) - \psi_1^j(t) \cdot k_{10} \cdot E_1 \cdot x_1^j(t)}{\psi_2^j(t) \cdot k_{20} \cdot E_2 \cdot x_2^j(t)} \right]^{-1}.$$

Наведена вище формула є більш простою за своєю структурою, ніж вираз для u^j при застосуванні Extr-H методу, яке визначається за допомогою формули (1.8) і, таким чином, потребує меншої кількості обчислювальних операцій.

1.1.3 Метод квазілінеаризації

Ще одну можливість розв'язання диференціальних рівнянь загального виду

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1.10)$$

з граничними умовами:

$$a_i = [x(t), t_0] = 0, i = 1, \dots, p \leq n; \quad (1.11)$$

$$e_k = [x(T), T] = 0, k = 1, \dots, q \leq n \quad (1.12)$$

надає метод квазілінеаризації.

Вектор керування u в рівнянні (1.10) повинен бути визначеним таким чином, щоб функціонал J набув мінімального значення:

$$J = h_0 \cdot [x(T), T] + \int_{t_0}^T f_0[x(t), u(t), t] dt, \quad (1.13)$$

де h_0 та f_0 – відомі скалярні функції своїх аргументів.

На відміну від методу Ньютона-Рафсона, в цьому методі ітерації здійснюються таким чином, що на кожному ітераційному кроці граничні умови (1.11) та (1.12) виконуються точно і наближення здійснюється лише по відношенню до диференціальних рівнянь:

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						15
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$x' = f(x, \psi, t), \quad (1.14)$$

$$\psi' = g(x, \psi, t) \quad (1.15)$$

з граничними умовами в простій формі:

$$x_i(t_0) = x_{i0}, i = 1, \dots, n; \quad (1.16)$$

$$x_k(T) = x_{kT}, k = 1, \dots, n; \quad (1.17)$$

Значення функції h_0 у функціоналі (1.13) дорівнює нулю, а час керування T є заданим.

Якщо визначити нові вектори як:

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \dots \\ \psi \end{bmatrix},$$

$$h = \begin{bmatrix} f \\ \dots \\ g \end{bmatrix},$$

рівняння (1.14) та рівняння (1.15) набувають вигляду:

$$y' = h(y, t). \quad (1.18)$$

Нелінійне диференціальне рівняння (1.18) лінеаризується відносно номінального розв'язку

$$y = y^0(t)$$

					02.15.ЕЕ2221.КРМ.2023-ПЗ	Лист
						16
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

розкладом в ряд Тейлора та відкиданням нелінійних його доданків.

Тоді:

$$\tilde{y}' = h(y^0, t) + J(y^0, t) \cdot [\tilde{y}(t) - y^0(t)], \quad (1.19)$$

де $J(y^0, t)$ - матриця Якобі, яка визначається наступним чином:

$$J(y^0, t) = \frac{\partial h(y^0, t)}{\partial y^0}.$$

Підставляючи в рівняння (1.19) вираз:

$$v^0(t) = h(y^0, t) - J(y^0, t) \cdot y^0(t),$$

отримаємо з рівняння (1.19) лінійну нестационарну систему:

$$\tilde{y}' = J(y^0, t) \cdot \tilde{y}(t) + v^0(t), \quad (1.20)$$

в якій $v^0(t)$ може бути інтерпретована як відома функція керування.

Завдяки лінійності диференціального рівняння (1.20) та граничним умовам (1.16) та (1.17) задача є лінійною.

Для розв'язання задачі використовується справедливий для лінійних систем принцип суперпозиції. Для однорідного рівняння, отриманого з рівняння (1.20) справедливим є розв'язок:

$$\tilde{y}_n(t) = \Phi(t, t_0) \cdot \tilde{y}(t_0). \quad (1.21)$$

При цьому фундаментальна матриця задовольняє матричному диференціальному рівнянню:

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$\frac{d\Phi(t, t_0)}{dt} = J(y^0, t) \cdot \Phi(t, t_0)$$

при

$$\Phi(t, t_0) = I.$$

Окремий розв'язок рівняння (1.20) обчислюється або безпосередньо інтегруванням рівняння (1.20) з початковими умовами:

$$\tilde{y}_p(t_0) = 0,$$

або з використанням фундаментальної матриці $\Phi(t, t_0)$ на основі виразу:

$$\tilde{y}_p(t) = \int_{t_0}^{\tau} \Phi(t, s) \cdot v^0(s) ds. \quad (1.22)$$

В першому випадку повинні бути розв'язані скалярні диференціальні рівняння, в іншому випадку потрібно обчислити інтеграли.

Повний розв'язок визначається як суперпозиція виразів (1.21) та (1.22):

$$\tilde{y}(t) = \Phi(t, t_0) \cdot \tilde{y}(t_0) + \tilde{y}_p(t). \quad (1.23)$$

В формулі (1.23) $\tilde{y}(t_0)$ визначається за формулою:

$$\tilde{y}(t_0) = \begin{bmatrix} x(t_0) \\ \dots \\ \psi(t_0) \end{bmatrix}, \quad (1.24)$$

в якій значення вектора $\psi(t_0)$ спряжених змінних в початковий момент є невідомим.

Для визначення $\psi(t_0)$ розглянемо вираз (1.24) в момент $t=T$.

Розділяючи фундаментальну матрицю $\Phi(t, t_0)$ на підматриці, вираз (1.23) можна представити у вигляді:

$$\tilde{y}(T) - \tilde{y}_p(T) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(T, t_0) & \vdots & \Phi_{12}(T, t_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{21}(T, t_0) & \vdots & \Phi_{22}(T, t_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t_0) \\ \dots \\ \psi(t_0) \end{bmatrix}. \quad (1.25)$$

Враховуючи, що:

$$\tilde{y}(T) = \begin{bmatrix} x(T) \\ \dots \\ \psi(T) \end{bmatrix},$$

$$\tilde{y}_p(T) = \begin{bmatrix} x_p(T) \\ \dots \\ \psi_p(T) \end{bmatrix},$$

отримаємо з рівняння (1.25) безпосередньо розв'язок для $\psi(t_0)$:

$$\psi(t_0) = [\Phi_{12}(T, t_0)]^{-1} \cdot [x_T - x_p(T) - \Phi_{11}(T, t_0) \cdot x(t_0)]. \quad (1.26)$$

Підставляючи вираз (1.26) у формули (1.23) та (1.24) отримаємо розв'язок для $\tilde{y}(t)$.

Якщо граничні умови задачі оптимізації на відміну від формули (1.16) та формули (1.17) задано у вигляді:

$$x_i(t_0) = x_{i0}, i = 1, \dots, n;$$

$$x_k(T) = x_{kT}, k = 1, \dots, q < n,$$

то формула (1.25) набуває вигляду:

$$\tilde{y}(T) - \tilde{y}_p(T) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(T, t_0) & \vdots & \Phi_{12}(T, t_0) \\ \Phi_{21}(T, t_0) & \dots & \Phi_{22}(T, t_0) \\ \Phi_{31}(T, t_0) & \vdots & \Phi_{32}(T, t_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t_0) \\ \dots \\ \psi(t_0) \end{bmatrix}. \quad (1.27)$$

З рівняння (1.27) остаточно отримаємо:

$$\psi(t_0) = \begin{bmatrix} \Phi_{12}(T, t_0) \\ \dots \\ \Phi_{32}(T, t_0) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_T - \hat{x}_p(T) - \Phi_{11}(T, t_0) \cdot x(t_0) \\ \dots \\ \hat{\psi}_T - \hat{\psi}_p(T) - \Phi_{31}(T, t_0) \cdot x(t_0) \end{bmatrix}, \quad (1.28)$$

причому $\hat{\psi}_T = 0$.

Якщо граничні умови задано в самому загальному вигляді згідно з рівняннями (1.11) та (1.12), то $\psi(t_0)$ визначається відповідним чином.

Труднощі виникають лише тоді, коли граничні умови є нелінійними. В цих випадках $\psi(t_0)$ може бути визначено лише чисельно.

Особливо важливим є випадок, коли правий край є вільним, тобто коли для $x(t)$ всі $x_k(T)$ ($k=1, \dots, n$) є вільними і завдяки цьому у функціоналі (1.13) присутня незникаюча функція $h_0[x(T), T]$.

З умови трансверсальності можна отримати наступну спряжену систему:

$$\psi(T) = -\frac{\partial h_0[x(T), T]}{\partial x(T)}.$$

Якщо функція $h_0[x(T), T]$ є лінійною по $x(T)$, то справедливим є вираз:

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						20
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$\frac{\partial h_0[x(T), T]}{\partial x(T)} = l,$$

де l – сталий вектор.

В цьому випадку $\psi(t_0)$ визначається з формули (1.28) при підстановці до неї $\hat{\psi}_T = \psi_T = -l$:

$$\psi(t_0) = [\Phi_{32}(T, t_0)]^{-1} \cdot [-l - \psi_p(T) - \Phi_{31}(T, t_0) \cdot x(t_0)].$$

Якщо функція $h_0[x(T), T]$ є квадратичною по $x(T)$, то можна отримати вираз:

$$\frac{\partial h_0[x(T), T]}{\partial x(T)} = L \cdot x(T),$$

в якому матриця L є сталою, а $\psi(t_0)$ визначається з виразу:

$$\psi(t_0) = [\Phi_{22}(T, t_0) - L \cdot \Phi_{12}(T, t_0)]^{-1} \cdot \{L \cdot [x_p(T) + \Phi_{11}(T, t_0) \cdot x(t_0)] - \psi_p(T) - \Phi_{21}(T, t_0) \cdot x(t_0)\}.$$

Розв'язок, який визначається формулами (1.23) та (1.24) лінійної системи (1.20) являє собою наближений розв'язок системи (1.18).

В дійсності цей наближений розв'язок спочатку не буде повністю співпадати з розв'язком системи (1.18). Тому необхідно покращити отриманий номінальний розв'язок за допомогою кроків наступного алгоритму:

1) Для $j=0$ оцінюється номінальний розв'язок $y^j(t)$, який розглядається як початкове наближення. Це початкове наближення не обов'язково повинно задовольняти граничним умовам задачі.

2) Нелінійне диференціальне рівняння (1.18) лінеаризується відносно

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

наближення $y^j(t)$ ($j=0, 1, \dots$).

3) Для отриманих лінійних рівнянь (1.21) гранична задача розв'язується описаним способом, тобто визначається $\tilde{y}^j(t)$ в такий спосіб, що виконуються задані граничні умови.

4) Розв'язок $y(t)$ допоміжного диференціального рівняння (1.20) розглядається як новий номінальний розв'язок $y^{j+1}(t)$, і вся процедура повторюється спочатку, починаючи з другого кроку до тих пір, поки не буде отримано необхідну точність.

Варто відмітити наступні переваги методу квазілінеаризації.

По-перше, виходячи з фізичних міркувань простіше визначити $y^0(t)$ як початкове наближення, ніж визначити початковий стан спряженої системи $\psi^0(t_0)$.

По-друге, метод квазілінеаризації є набагато менш чутливішим щодо початкового наближення $y^0(t)$

Відносно припущення щодо стійкості та диференціювання розв'язку при застосуванні методу квазілінеаризації варто зазначити, що в загальному випадку цей метод не може використовуватись для розв'язання задач оптимізації з обмеженим керуванням.

Сходимість при використанні методу квазілінеаризації є квадратичною.

При ітераціях спочатку обчислюється матриця Якобі J^j для кожного y^j ($y=0, 1, 2, \dots$), а також вектор керування v^j .

Потім за допомогою чисельного інтегрування визначається фундаментальна матриця Φ^{j+1} , потім – окремий розв'язок $y_p^{j+1}(t)$. Це здійснюється також за допомогою методів чисельного інтегрування.

При відомих Φ^{j+1} та y_p^{j+1} розв'язується лінійна система рівнянь для обчислення $\psi^{j+1}(t_0)$, яке застосовується для визначення повного розв'язку $y^{j+1}(t)$.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						22
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Після визначення похибки вирішується питання щодо продовження ітерацій. У випадку продовження ітерацій процес розрахунку починається з обчислення матриці Якобі та вектора керування.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2 ВЕРИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ТА ТРУБЧАСТИХ РЕАКТОРАХ

2.1 Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі

Для розв'язання задачі оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі в програмному середовищі необхідно виконати наступні дії:

1) Обрати вимірність задачі, що розв'язується.

В даному випадку задача є одновимірною.

2) Обрати тип диференціальних рівнянь в залежності від типу задачі.

В даному випадку задача є стаціонарною.

3) Задати залежні змінні задачі, зокрема, концентрації продукту A та продукту B як c_1 та c_2 відповідно.

Виконання наведених вище дій призводить до формування системи двох диференціальних рівнянь у відповідності до кількості невідомих величин (c_1 та c_2) задачі.

4) Задати значення довжини реактора L .

5) Задати константи, які містяться в даній задачі і наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1- Вікно присвоєння значень коефіцієнтів

Ім'я	Значення
c_{10}	0,00053 моль/м ³
c_{20}	0,00043 моль/м ³
k_{10}	$8,92 \cdot 10^8$ 1/с
k_{20}	$7,68 \cdot 10^{15}$ 1/с
E_1	18000 Дж/моль
E_2	30000 Дж/моль
R	2 Дж/(моль·К)

6) Задати обидва диференціальних рівняння, тобто диференціальне рівняння (1.2) та диференціальне рівняння (1.3).

7) Задати граничні умови (Діріхле та Неймана) для обох диференціальних рівнянь.

8) Задати цільову функцію та обмеження, які накладено на параметри, що описують задачу.

Задання цільової функції та обмежень здійснюється на основі наступних критеріїв [2, 3].

Оскільки задача оптимізації полягає у тому, щоб при відомій довжині трубчастого реактора L знайти такий розподіл температур по довжині трубчастого реактора, при якому на виході з нього речовина B повинна набувати максимального значення своєї концентрації, тобто функція оптимізації набуватиме максимального значення, необхідно задати вираз для цільової функції саме на виході з трубчастого реактора.

9) Задати параметр або декілька параметрів, зміна яких дозволить визначити максимальне значення цільової функції.

10) Задати межі зміни значень параметра або декількох параметрів, згаданих вище.

11) Задати границі зміни (розрахункова область задачі, границя розрахункової області, точка в межах розрахункової області) параметра або декількох параметрів, згаданих вище.

Згідно з умовами задачі, параметром, зміна якого дозволить визначити максимальне значення цільової функції, є температура T в трубчастому реакторі.

В якості початкового значення температури T в трубчастому реакторі задається значення 350K.

Після цього задання всіх умов задачі завершено.

12) Побудувати скінченноелементну сітку в розрахунковій області задачі.

13) Отримати розв'язок задачі.

Отриманий розв'язок потрібно порівняти з розв'язком, наведеним Хофером в літературі [1].

2.2 Задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу

Розглянемо задачу в якій в трубчастому хімічному реакторі відбуваються декілька хімічних реакцій. Для здійснення контролю за швидкістю протікання хімічних реакцій застосовується охолоджувальний кожух з охолоджувальною

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						25
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

рідиною.

Схема трубчастого хімічного реактора наведена на рисунку 2.1.

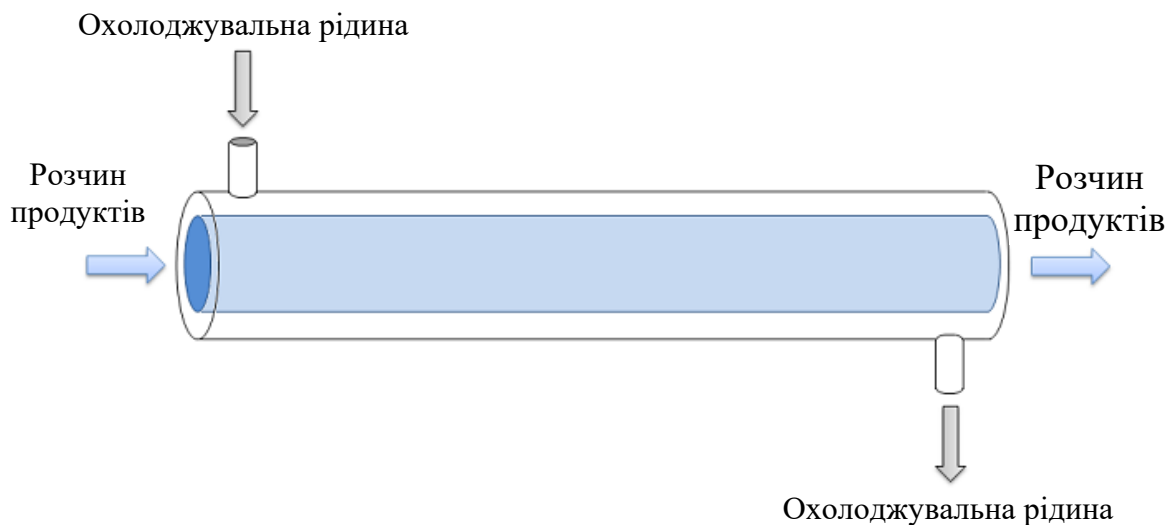
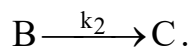
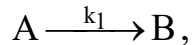


Рисунок 2.1- Схема трубчастого реактора

Дві послідовні хімічні реакції відбуваються в трубчастому хімічному реакторі:



Метою оптимізації є визначення такого значення температури охолоджувальної рідини $T_{okholodzhuvach}$ на вході до охолоджувального кожуха при відомій довжині трубчастого реактора L , при якому на виході з трубчастого реактора концентрація продукту B набуватиме максимального значення.

Для спрощення розрахунку задача з двовимірної перетворюється на одновимірну, тобто розподіл усіх параметрів відбувається вздовж осі абсцис, (осі x).

Значення констант для задачі наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2- Константи для умов задачі

Константа	Розмірність	Значення
c_{A_0}	моль/м ³	700
A_1	1/с	$1,6 \cdot 10^8$
A_2	1/с	$1,0 \cdot 10^{15}$
E_1	Дж/моль	75000
E_2	Дж/моль	125000
R	Дж/(моль · К)	8,314
L	м	2
$u_{\text{розчин}}$	м/с	0,0042
H_1 ,	Дж/моль	200000
H_2	Дж/моль	100000
D	м ² /с	$1,0 \cdot 10^{-8}$
UA	Вт/(м ³ · К)	10000
Початкова температура речовини на вході до реактора	К	400
$u_{\text{охолоджувач}}$	м/с	0,001
$T_{\text{розчин}0}$	К	400
$T_{\text{охолоджувач}0}$ (первинне наближення)	К	350

де c_{A_0} - концентрація речовини A на вході до реактора;

A_1, A_2 – константи;

E_1 та E_2 - енергія активації хімічної реакції;

R – константа;

L - довжина реактора;

$u_{\text{розчин}}$ - швидкість руху розчину речовин в реакторі;

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						27
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

H_1 та H_2 – константи;

D - коефіцієнт дифузії;

UA - об'ємний коефіцієнт тепловіддачі;

$u_{\text{охолоджувач}}$ - швидкість руху охолоджувальної рідини в охолоджувальному кожусі;

$T_{\text{розчин}_0}$ - температура розчину на вході до трубчастого реактора;

$T_{\text{охолоджувач}_0}$ - температура охолоджувальної рідини (первинне наближення).

Процеси тепло- та масообміну, які відбуваються в трубчастому реакторі та його системі охолодження описуються наступною системою рівнянь:

$$-D \cdot \frac{d^2 c_A}{dx^2} = R_1 - u_{\text{розчин}} \cdot \frac{dc_A}{dx}, \quad (2.1)$$

$$-D \cdot \frac{d^2 c_B}{dx^2} = R_2 - u_{\text{розчин}} \cdot \frac{dc_B}{dx}, \quad (2.2)$$

$$-\lambda_{\text{розчин}} \cdot \frac{d^2 T_{\text{розчин}}}{dx^2} = Q_{\text{розчин}} - \rho_{\text{розчин}} \cdot c_{\text{тр розчин}} \cdot u_{\text{розчин}} \cdot \frac{dT_{\text{розчин}}}{dx}, \quad (2.3)$$

$$-\lambda_{\text{охолоджувач}} \cdot \frac{d^2 T_{\text{охолоджувач}}}{dx^2} = Q_{\text{охолоджувач}} - \rho_{\text{охолоджувач}} \cdot c_{\text{тр охолоджувач}} \cdot u_{\text{охолоджувач}} \cdot \frac{dT_{\text{охолоджувач}}}{dx}, \quad (2.4)$$

де x - поздовжня координата, м;

c_A - масова концентрація речовини A в трубчастому реакторі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

R_1 - швидкість протікання реакції перетворення продукту A в продукт B , $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;

$u_{\text{розчин}}$ - швидкість руху розчину речовин в трубчастому реакторі, $\text{м}/\text{с}$;

c_B - масова концентрація речовини B в трубчастому реакторі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

R_2 - швидкість протікання реакції перетворення продукту B в продукт C , $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;

					02.15.ЕЕ2221.КРМ.2023-ПЗ	Лист
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$\lambda_{розчин}$ - коефіцієнт теплопровідності розчину речовин в трубчастому реакторі, Вт/(м·К) [4];

$T_{розчин}$ - температура розчину речовин в трубчастому реакторі, К;

$Q_{розчин}$ - теплота, яка надходить в розчин речовин в трубчастому реакторі, Вт/м³ ;

$\rho_{розчин}$ - густина розчину речовин в трубчастому реакторі, кг/м³ ;

$c_{тр розчин}$ - середня масова ізобарна теплоємність розчину речовин в трубчастому реакторі, Дж/(кг·К);

$\lambda_{охолоджувач}$ - коефіцієнт теплопровідності рідини, що протікає всередині кожуха реактора та охолоджує його стінки, Вт/(м·К);

$T_{охолоджувач}$ - температура охолоджувальної рідини всередині кожуха реактора, К;

$Q_{охолоджувач}$ - кількість теплоти, яка передається від розчину речовин рідині, що протікає всередині кожуха реактора та охолоджує його стінки, Вт/м³ ;

$\rho_{охолоджувач}$ - густина охолоджувальної рідини, що протікає всередині кожуха реактора та охолоджує його стінки, кг/м³ ;

$c_{тр охолоджувач}$ - середня масова ізобарна теплоємність охолоджувальної рідини, що протікає всередині кожуха реактора та охолоджує його стінки, Дж/(кг·К);

$u_{охолоджувач}$ - швидкість руху охолоджувальної рідини всередині охолоджувального кожуха, м/с .

Швидкість хімічної реакції перетворення речовини A в речовину B в формулі (2.1) визначається з виразу:

$$R_1 = -c_A \cdot A_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot T_{розчин}}} . \quad (2.5)$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Швидкість хімічної реакції перетворення речовини B в речовину C в формулі (2.2) визначається з виразу:

$$R_2 = c_A \cdot A_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot T_{\text{розчин}}}} - c_B \cdot A_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot T_{\text{розчин}}}}. \quad (2.6)$$

Кількість теплоти, яка надходить до розчину, в формулі (2.3) визначається за формулою:

$$Q_{\text{розчин}} = -H_1 \cdot \left(c_A \cdot A_1 \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot T_{\text{розчин}}}} \right) - H_2 \cdot \left(c_B \cdot A_2 \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot T_{\text{розчин}}}} \right) - UA \cdot (T_{\text{розчин}} - T_{\text{охолоджувач}}). \quad (2.7)$$

Кількість теплоти, яка надходить від розчину до охолоджувальної рідини, в формулі (2.4) визначається за формулою:

$$Q_{\text{охолоджувач}} = UA \cdot (T_{\text{розчин}} - T_{\text{охолоджувач}}). \quad (2.8)$$

Граничні умови для рівнянь (2.1) та (2.2) наступні [5]:

- при вході розчину речовин A та B до трубчастого реактора задаються значення їх концентрацій;
- при виході розчину речовин A та B з трубчастого реактора задається гранична умова Неймана, оскільки точні значення концентрацій речовин A та B при виході їх з трубчастого реактора є невідомими.

Граничні умови для рівнянь (2.3) та (2.4) наступні:

- при вході розчину речовин A та B до трубчастого реактора задається температура розчину;
- при вході рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора, до охолоджувального кожуха задається температура рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора;

- при виході розчину речовин A та B з трубчастого реактора та при виході рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора, з охолоджувального кожуха задається гранична умова Неймана оскільки точне значення температури розчину речовин при виході з трубчастого реактора та температури рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора, на виході з охолоджувального кожуха є невідомими.

Для розв'язання задачі оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу в програмному середовищі необхідно виконати наступні дії:

1) Обрати вимірність задачі, що розв'язується.

В даному випадку задача є одновимірною.

2) Обрати тип диференціальних рівнянь в залежності від типу задачі.

В даному випадку задача є стаціонарною.

3) Задати залежні змінні задачі, зокрема, концентрації речовини A та речовини B як c_A та c_B відповідно, задати температуру розчину речовин $T_rozchyn$ та температуру охолоджувальної рідини $T_okholodzhuvach$.

Виконання наведених вище дій призводить до формування системи чотирьох диференціальних рівнянь у відповідності до кількості невідомих величин (c_1 , c_2 , $T_rozchyn$, $T_okholodzhuvach$) задачі.

4) Задати значення довжини реактора L .

5) Задати константи, які містяться в даній задачі і наведені в таблиці 2.2.

6) Задати всі диференціальні рівняння, тобто диференціальні рівняння (2.1), (2.2), (2.3), (2.4).

7) Задати граничні умови (Діріхле та Неймана) для всіх диференціальних рівнянь.

8) Задати цільову функцію та обмеження, які накладено на параметри, що описують задачу.

Задання цільової функції та обмежень здійснюється на основі наступних критеріїв.

Оскільки задача оптимізації полягає у тому, щоб при відомій довжині

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

трубчастого реактора L знайти таке значення температури рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора, $T_{okholodzhuvach}$ на вході до охолоджувального кожуха, при якому на виході з трубчастого реактора речовина B повинна набувати максимального значення її концентрації, тобто функція оптимізації набудуватиме максимального значення, необхідно задати вираз для цільової функції саме на виході з трубчастого реактора.

9) Задати параметр або декілька параметрів, зміна яких дозволить визначити максимальне значення цільової функції.

10) Задати межі зміни значень параметра або декількох параметрів, згаданих вище.

11) Задати границі зміни (розрахункова область задачі, границя розрахункової області, точка в межах розрахункової області) параметра або декількох параметрів, згаданих вище.

Згідно з умовами задачі, параметром, зміна якого дозволить визначити максимальне значення цільової функції, є температура рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора $T_{okholodzhuvach}$.

В якості початкового значення температури рідини, що охолоджує стінки трубчастого реактора $T_{okholodzhuvach}$ задається значення 350K.

Після цього задання всіх умов задачі завершено.

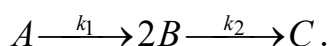
12) Побудувати скінченноелементну сітку в розрахунковій області задачі.

13) Отримати розв'язок задачі.

Отриманий розв'язок потрібно порівняти з розв'язком, наведеним Хофером в літературі [1].

2.3 Задача оптимального керування хімічною реакцією в трубчастому реакторі

Розглядається трубчастий реактор, в якому відбувається газова реакція наступного вигляду:



					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						32
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Реакція переходу компонентів зі стану A до стану B – першого порядку, реакція переходу компонентів зі стану B до стану C – другого порядку.

Задачею оптимізації є управління тиском P по довжині L трубчастого реактора таким чином, щоб кількість речовини B на виході з трубчастого реактора набувала максимального значення.

Рівняння реакцій для концентрацій x_1 та x_2 речовини A та речовини B відповідно можуть бути записані у вигляді:

$$G \cdot \frac{dx_1}{dl} = -k_1 \cdot p_1,$$

$$G \cdot \frac{dx_2}{dl} = 2 \cdot k_1 \cdot p_1 - k_2 \cdot p_2^2,$$

де $p_1(l)$ та $p_2(l)$ - відповідний парціальний тиск, Па;

G – масова витрата речовин в трубчастому реакторі.

Якщо припустити, що в хімічну реакцію вступає ідеальний газ, значення парціального тиску визначаються за законом Дальтона:

$$p_1 = \frac{x_1}{x_1 + x_2 + x_3} \cdot P, \quad (2.9)$$

$$p_2 = \frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3} \cdot P, \quad (2.10)$$

де P – абсолютний тиск;

x_3 – концентрація речовини C .

На вході до трубчастого реактора ($L=0$) початкові значення концентрацій речовин є відомими:

$$x_1(0) = x_{10},$$

$$x_2(0) = x_{20},$$

$$x_3(0) = 0.$$

Тоді баланс маси можна записати так:

$$x_3(l) = [x_{10} - x_1(l)] + \frac{1}{2} \cdot [x_{20} - x_2(l)]. \quad (2.11)$$

Якщо нормувати довжину L трубчастого реактора за допомогою масової витрати G речовин в трубчастому реакторі та ввести позначення:

$$\alpha = x_{10} + \frac{x_{20}}{2}, \quad (2.12)$$

то, використовуючи формули (2.9)-(2.12) можна отримати рівняння реакцій в остаточній формі:

$$x_1' = -k_1 \cdot \frac{2 \cdot x_1}{2 \cdot \alpha + x_2} \cdot u, \quad (2.13)$$

$$x_2' = 2 \cdot k_1 \cdot \frac{2 \cdot x_1}{2 \cdot \alpha + x_1} \cdot u - k_2 \cdot \left[\frac{2 \cdot x_2}{2 \cdot \alpha + x_2} \right]^2 \cdot u^2, \quad (2.14)$$

де штрихом позначено похідну по нормованій довжині L/G трубчастого реактора, а керування u є ідентичним тиску P .

Функціонал, значення якого потрібно зробити мінімальним в даній задачі має наступний вигляд:

$$J = -x_2(L/G) \rightarrow \min.$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						34
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таким чином, отримано варіаційну задачу Майєра.

Для розв'язання даної задачі потрібно отримати рівняння, спряжені рівнянню (2.13) та рівнянню (2.14).

Отримасмо рівняння наступного виду:

$$\psi_1' = -\frac{2 \cdot k_1}{2 \cdot \alpha + x_2} \cdot (2 \cdot \psi_2 - \psi_1) \cdot u, \quad (2.15)$$

$$\psi_2' = k_1 \cdot \frac{2 \cdot x_1}{(2 \cdot \alpha + x_2)^2} \cdot (2 \cdot \psi_2 - \psi_1) \cdot u + \frac{16 \cdot k_2 \cdot \alpha \cdot x_2 \cdot \psi_2}{(2 \cdot \alpha + x_2)^3} \cdot u^2. \quad (2.16)$$

Умова трансверсальності дає для рівняння (2.15) та рівняння (2.16) кінцеві умови задачі:

$$\psi_1(L/G) = 0,$$

$$\psi_2(L/G) = 1.$$

На основі функції Гамільтона для даної задачі оптимізації оптимальне управління можна отримати у вигляді:

$$u^* = -\frac{k_1}{4 \cdot k_2} \cdot \frac{(2 \cdot \alpha + x_2) \cdot (2 \cdot \psi_2 - \psi_1) \cdot x_1}{\psi_2 \cdot x_2^2}. \quad (2.17)$$

Підставляючи вираз (2.17) в рівняння (2.13)-(2.16) та використовуючи змінні x та ψ отримаємо для системи змінних y нелінійну систему диференціальних рівнянь:

$$y_1' = -\frac{k_1^2}{2 \cdot k_2} \cdot \frac{y_1^2}{y_2^2} \cdot \frac{(2 \cdot y_4 - y_3)}{y_4}, \quad y_1(0) = y_{10}; \quad (2.18)$$

$$y_2' = -\frac{k_1^2}{k_2} \cdot \frac{y_1^2}{y_2^2} \cdot \frac{(4 \cdot y_4^2 - y_3^2)}{4 \cdot y_4^2}, \quad y_2(0) = y_{20}; \quad (2.19)$$

$$y_3' = -\frac{k_1^2}{2 \cdot k_2} \cdot \frac{y_1^2}{y_2^2} \cdot \frac{(2 \cdot y_4 - y_3)^2}{y_4}, \quad y_3(L/G) = 0; \quad (2.20)$$

$$y_4' = -\frac{k_1^2}{2 \cdot k_2} \cdot \frac{y_1^2}{y_2^2} \cdot \frac{(2 \cdot y_4 - y_3)^2}{y_4}, \quad y_4(L/G) = 1. \quad (2.21)$$

З рівнянь (2.18)-(2.21) необхідно отримати лінійну систему диференціальних рівнянь.

Для прикладу розрахунку використовувались наступні числові значення:

$$k_{10} = 120 \cdot 10^8 \text{ (кг·моль)/(м}^3\text{·с·Па);}$$

$$k_{20} = 378 \cdot 10^{14} \text{ (кг·моль)/(м}^3\text{·с·Па);}$$

$$E_1 = 75420 \text{ Дж/моль;}$$

$$E_2 = 125700 \text{ Дж/моль;}$$

$$R = 8,38 \text{ Дж/(моль·К);}$$

$$x_{10} = 0,0105 \text{ кг/моль·кг;}$$

$$x_{20} = 0,0085 \text{ кг/моль·кг;}$$

$$L/G = 480 \text{ м}^3\text{·с/кг;}$$

$$T_0 = 380 \text{ К.}$$

В якості початкового наближення приймається:

$$u^0(t) = 380 \text{ К.}$$

Для розрахунку констант швидкості реакції використовувалось рівняння Арреніуса:

$$k_1 = k_{10} \cdot e^{\frac{-E_1}{R \cdot \theta}},$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						36
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$k_2 = k_{20} \cdot e^{\frac{-E_2}{R \cdot \theta}},$$

Результати розрахунку наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 2.3- Результати розрахунку при використанні методу квазілінеаризації

Номер ітерації j	Критерій $x_2(L/G)$
0	0,00850000
1	0,01166997
2	0,01397334
3	0,01514870
4	0,01508286
5	0,01508589
6	0,01508588

3 АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ

3.1 Задача оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника

В цій задачі розглядається процедура оптимізації оребреного одноходового, протитечійного кожухотрубного теплообмінника в якому протікає вода в турбулентному режимі.

Схему теплообмінника наведено на рисунку 3.1.

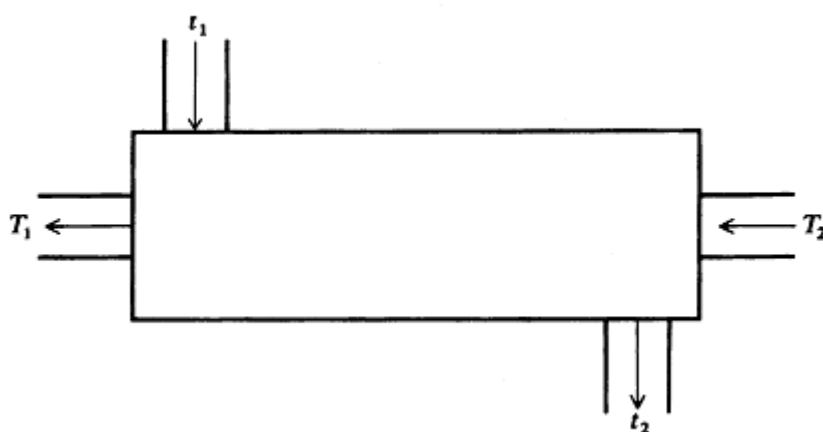


Рисунок 3.1- Схема оребреного одноходового протитечійного
кожухотрубного теплообмінника

Зазвичай, відомими є наступні величини [6, 7]:

- масова витрата гарячої води, яка проходить через труби теплообмінника W_i ;
- температурний перепад води в теплообміннику $T_2 - T_1$;
- температура охолоджувальної води, яка протікає в кожусі теплообмінника t_1 ;
- крок розташування труб, а також внутрішній та зовнішній діаметри труб D_i, D_0 .

Величини, які потрібно розрахувати завдяки розв'язанню задачі оптимізації:

- загальна площа теплообмінної поверхні A_0 ;
- перепад температури на виході нагрітої води з теплообмінника $\Delta t_2 = T_2 - t_2$
- кількість та довжина труб N_i та L відповідно;
- кількість ребер n_b ;

- перепади тиску в трубах та кожусі теплообмінника;
- масова витрата холодної води, яка проходить через кожух теплообмінника W_c .

Цільова функція записується наступним чином [8]:

$$C = C_c \cdot W_c \cdot y + C_A \cdot A_0 + C_i \cdot E_i \cdot A_0 + C_0 \cdot E_0 \cdot A_0, \text{ грн./рік}, \quad (3.1)$$

де C_c вартість охолоджувальної води, грн./кг;

C_A - щорічні витрати на теплообмінник в розрахунку на одиницю зовнішньої поверхні труб теплообмінника, грн./($\text{м}^2 \cdot \text{рік}$);

C_i - щорічні витрати на гарячий теплоносій (гарячу воду), (грн.год/Н·м·рік);

E_i - втрати енергії (тиску) в трубах в розрахунку на одиницю зовнішньої поверхні труб теплообмінника, (Н·м)/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$);

C_0 - щорічні витрати на холодний теплоносій (охолоджувальну воду), (грн.год/Н·м·рік);

E_0 - втрати енергії (тиску) в кожусі теплообмінника в розрахунку на одиницю зовнішньої поверхні труб теплообмінника, (Н·м)/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$);

Припустимо, що потрібно мінімізувати цільову функцію використовуючи наступні чотири параметри:

- перепад температури на виході нагрітої води з теплообмінника Δt_2 , °С;
- загальна площа теплообмінної поверхні A_0 , м^2 ;
- α_i - коефіцієнт тепловіддачі між гарячою водою та внутрішньою поверхнею труб теплообмінника, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$);
- α_0 - коефіцієнт тепловіддачі між зовнішньою поверхнею труб теплообмінника та охолоджувальною водою, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

Тільки три з чотирьох параметрів є незалежними.

Якщо значення параметрів A_0 , α_i , α_0 є відомими, то параметр Δt_2 може бути знайдений за допомогою значення теплового потоку в теплообміннику:

$$Q = F_t \cdot U_0 \cdot A_0 \cdot \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)}, \quad (3.2)$$

де $F_t=1$ для одноходового теплообмінника.

Величину U_0 можна визначити знаючи величини α_i , α_0 , а також значення коефіцієнта забруднення α_t поверхонь теплообмінника:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{f_A \cdot \alpha_i} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\alpha_t}, \quad (3.3)$$

де f_A - коефіцієнт, який обчислюється за виразом:

$$f_A = \frac{A_i}{A_0},$$

де A_i - площа внутрішньої поверхні труб теплообмінника, m^2 .

Втрати енергії (тиску) в трубах в розрахунку на одиницю зовнішньої поверхні труб теплообмінника можуть бути визначені за формулою:

$$E_i = \phi_i \cdot \alpha_i^{3,5}, \quad (3.4)$$

$$E_0 = \phi_0 \cdot \alpha_0^{4,75}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнти ϕ_i та ϕ_0 залежать від теплоємності води c , коефіцієнта її теплопровідності λ , густини ρ , динамічного коефіцієнта в'язкості води та діаметра труб теплообмінника.

З рівняння енергетичного балансу можна отримати величину масової витрати холодної води, яка проходить через кожух теплообмінника W_c :

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$W_c = \frac{Q}{c \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2 + T_2 - T_1)}, \quad (3.6)$$

і замінюючи параметри E_i , E_0 та W_c в рівнянні (3.1) вираз для визначення цільової функції змінить вигляд:

$$f = \frac{C_c \cdot y \cdot Q}{c \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2 + T_2 - T_1)} + C_A \cdot A_0 + C_i \cdot \phi_i \cdot \alpha_i^{3,5} \cdot A_0 + C_0 \cdot \phi_0 \cdot \alpha_0^{3,5} \cdot A_0.$$

Для запису обмеження цільової функції (3.2) використовується функція Лагранжа L , тоді обмеження цільової функції виглядатиме так:

$$L = f + \omega \cdot \left[\frac{F_t \cdot (\Delta t_2 - \Delta t_1)}{Q \cdot \ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)} - \frac{1}{U_0 \cdot A_0} \right], \quad (3.7)$$

де ω - множник Лагранжа.

Рівняння (3.7) можна продиференціювати відповідно до чотирьох параметрів (A_0 , α_i , α_0 та Δt_2).

Після певних перетворень можна отримати співвідношення між α_i та α_0 :

$$\alpha_0 = \left(\frac{0,74 \cdot C_i \cdot \phi_i \cdot f_A}{C_0 \cdot \phi_0} \right)^{0,17} \cdot \alpha_i^{0,78}. \quad (3.8)$$

Значення величини α_i можна знайти розв'язавши наступне рівняння:

$$C_A - 2,5 \cdot C_i \cdot \phi_i \cdot \alpha_i^{3,5} - 2,91 \cdot (C_0 \cdot \phi_0)^{0,17} \cdot (C_i \cdot \phi_i \cdot f_A)^{0,83} \cdot \alpha_i^{3,72} - \frac{3,5 \cdot C_i \cdot \phi_i \cdot f_A \cdot \alpha_i^{4,5}}{\alpha_i} = 0. \quad (3.9)$$

Одночасне розв'язання рівнянь (3.6), (3.8) та (3.9) дозволяє отримати наступний вираз:

$$\frac{C_c \cdot y \cdot U_0}{c \cdot (C_A + C_i \cdot E_i + C_0 \cdot E_0)} = \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right) - 1 + \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right].$$

Наступний алгоритм може бути застосований для обчислення оптимальних значень параметрів A_0 , α_i , α_0 та Δt_2 без обчислення множника Лагранжа ω :

- 1) Обчислення оптимального значення величини α_i з рівняння (3.9).
- 2) Обчислення оптимального значення величини α_0 з рівняння (3.8).
- 3) Обчислення значення величини U_0 з рівняння (3.3).
- 4) Обчислення значень величин E_i та E_0 з рівняння (3.4) та рівняння (3.5).
- 5) Обчислення оптимального значення величини A_0 з рівняння (3.2).
- 6) Обчислення значення величини W_c з рівняння (3.6).

Після обчислення зазначених вище параметрів можна визначити геометричні параметри теплообмінника.

7) Оптимальні значення швидкості руху води в трубах та між трубному просторі теплообмінника знаходиться з виразів для α_i та α_0 .

8) Кількість труб N_t в теплообміннику можна визначити з балансу маси:

$$v_i \cdot N_t \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} = W_i, \quad (3.10)$$

де v_i - середня швидкість руху води в трубах теплообмінника, м/с;

W_i - масова витрата гарячої води, що рухається всередині труб теплообмінника, кг/с.

9) Довжину труб L_t в теплообміннику можна знайти з виразу:

$$A_0 = N_t \cdot \pi \cdot D_0 \cdot L_t. \quad (3.11)$$

10) Відстань N_c між трубами теплообмінника може бути розрахована на основі кількості труб N_t в теплообміннику.

Площу S_0 для проходу води в міжтрубному просторі теплообмінника можна обчислити після визначення швидкості v_0 руху води в міжтрубному просторі теплообмінника.

Кількість ребер в міжтрубному просторі теплообмінника можна обчислити на основі значень величин S_0 , A_0 , N_t та N_c .

Далі визначається кількість ступенів свободи для даної задачі оптимізації, яка наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Визначення кількості ступенів свободи для задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника

Змінні в задачі оптимізації	Статус змінних (їх кількість)
$W_i, T_1, T_2, t_1, N_c, D_i, D_0, Q$	Значення цих восьми змінних задано за умовами задачі оптимізації
$\Delta t_2, W_c, A_0, N_t, L_t, U_0, n_b, \Delta p_t, \Delta p_s, v_i, v_0, \alpha_i, \alpha_0$	Значення цих тринадцяти змінних є невідомими за умовами задачі оптимізації
Загальна кількість змінних = 8+13 = 21	
Рівняння	Кількість рівнянь
Рівняння (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.10), (3.11)	7
Вирази для α_i та α_0 (крок 7)	2
$W_c = \rho_0 \cdot v_0 \cdot S_0$ (крок 10)	1
Загальна кількість рівнянь = 7+2+1 = 10	
Кількість ступенів свободи для даної задачі оптимізації = Загальна кількість змінних – Кількість заданих змінних – Загальна кількість рівнянь = 21 – 8 – 10 = 3	

Для задачі оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника можуть використовуватись наступні обмеження у вигляді нерівностей:

1) Обмеження на максимальне значення швидкості руху води в трубах теплообмінника та в міжтрубному просторі теплообмінника.

2) Обмеження на максимальне значення довжини труби.

3) Обмеження на мінімальне значення відстані між ребрами теплообмінника.

4) Обмеження на максимально допустимі значення втрат тиску води при її русі в трубах теплообмінника та в між трубному просторі теплообмінника.

Варіанти розв'язання задачі оптимізації для кожухотрубних теплообмінників наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Варіанти розв'язання задачі оптимізації для кожухотрубних теплообмінників

Параметр кожухотрубного теплообмінника	Оптимальне значення параметра	Варіанти параметрів кожухотрубних теплообмінників			
		Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Довжина труб, м	3,2	2,44	2,44	3,66	3,66
Кількість труб	66	110	85	64	42
Загальна площа, м ²	18,0	21,4	16,5	18,7	12,3
Загальна вартість, грн./рік	26424	32688	33228	26568	28224
Температура води на виході з теплообмінника, °C	47,3	38,9	35,8	48,9	44,7
Витрата води, кг/с	0,67	0,98	1,19	0,63	0,74
Перепад тиску в трубах теплообмінника, Па	1924	593	951	2193	4833
Перепад тиску в кожусі теплообмінника, Па	44471	36128	54538	34336	62949
Кількість ребер, шт.	119	85	79	121	119
Діаметр кожуха, м	0,30	0,41	0,36	0,30	0,25

3.2 Задача оптимізації теплообмінника з хімічно реагуючим теплоносієм

В теплообмінниках такого типу відбувається не тільки підігрів, але й випаровування і частковий перегрів теплоносія.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						44
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

При розв'язанні задач оптимізації для теплообмінників такого типу необхідно враховувати наступні особливості:

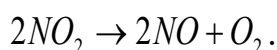
1) Характер розподілу температур та умов теплообміну вздовж теплообмінного апарата. Характерним є наявність мінімуму різниці температур між гарячим та холодним теплоносіями ΔT всередині економайзерної зони теплообмінного апарата та значна зміна коефіцієнта тепловіддачі з боку холодного теплоносія при переході через “псевдокритичну” температуру.

Тому, при розрахунках по середнім значенням параметрів такий тип теплообмінників необхідно ділити на три ділянки, а у випадку наявності до критичного значення тиску – на чотири ділянки:

- перегрівальну;
- випаровувальну;
- дві економайзерні ділянки.

Границею між останніми двома ділянками є точка мінімального температурного напору.

2) На розподіл температури теплоносія та теплообмін з боку гарячого теплоносія суттєво впливає кінетика хімічної реакції:



Зі зменшенням часу перебування теплоносія в тракці теплообмінного апарата посилюються прояви нерівноважних ефектів:

- зниження температури нижче значення рівноважної температури з боку гарячого теплоносія;
- зменшення впливу дифузійної складової на процес теплообміну.

Зі збільшенням часу перебування теплоносія в тракці теплообмінного апарата, значення температур на виході з теплообмінника, а, відповідно, і температурні напори асимптотично наближається до рівноважних значень.

Наближено вплив кінетики хімічної реакції на розподіл температури теплоносія та теплообмін з боку гарячого теплоносія можна представити у

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						45
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вигляді залежності середньологірифічного температурного напору від часу перебування t теплоносія на даній ділянці теплообмінного апарата [9]:

$$\Delta \bar{T}_{\kappa} = \Delta \bar{T}_p \cdot e^{-\frac{a_t}{t}}, \quad (3.12)$$

де $\Delta \bar{T}_p$ - середньологірифічний температурний напір теплоносія при рівноважній течії;

a_t - константа, що залежить від параметрів теплоносія і, в першу чергу, від тиску.

Рівняння (3.12) задовольняє граничним переходам: при $t \rightarrow \infty$, $\Delta \bar{T}_{\kappa} \rightarrow \Delta \bar{T}_p$, при $t \rightarrow 0$, $\Delta \bar{T}_{\kappa} \rightarrow 0$.

Коефіцієнт тепловіддачі з урахуванням впливу кінетики хімічної реакції можна обчислити з рівняння:

$$\alpha_{\kappa} = \alpha_f \cdot \left[1 + \left(\frac{C_{pe}}{C_{pf}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{b_t}{t}} \right],$$

де α_f - коефіцієнт тепловіддачі при “замороженій” течії теплоносія;

C_{pf} - теплоємність при “замороженій” течії теплоносія;

C_{pe} – теплоємність при рівноважній течії;

b_t - константа, що залежить від параметрів теплоносія.

Оскільки часу перебування теплоносія в тракті теплообмінного апарата визначається довжиною теплообмінного апарата, тобто:

$$t = \frac{L}{w_{\kappa}},$$

то розрахунок теплообмінного апарата виконується методом послідовних

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						46
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

наближень.

Довжина L теплообмінного апарата визначається за формулою:

$$L = \frac{Q}{\pi \cdot k \cdot \Delta \bar{T} \cdot x_1 \cdot x_3},$$

де Q – теплове навантаження теплообмінного апарата;

$\Delta \bar{T}$ - середньо логарифмічний температурний напір;

x_1 – зовнішній діаметр труб теплообмінного апарата;

x_3 – кількість труб в теплообмінному апараті;

k – коефіцієнт теплопередачі, приведений до зовнішньої поверхні труб теплообмінного апарата.

Швидкість руху гарячого теплоносія в міжтрубному просторі теплообмінника визначається за формулою:

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot x_3 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot (1,105 \cdot x_2^2 - x_1^2) - \delta_p \cdot n_p \cdot x_4 \right]},$$

де G_2 - витрата гарячого теплоносія;

ρ_2 - густина гарячого теплоносія;

x_2 – крок розташування труб в теплообмінному апараті;

δ_p – товщина ребра теплообмінного апарата;

n_p - кількість ребер в теплообмінному апараті;

x_4 – висота ребра в теплообмінному апараті.

Для розрахунку випаровувальної ділянки теплообмінного апарата коефіцієнт тепловіддачі при кипінні визначається за найбільш розповсюдженим рівнянням при кипінні в об'ємі:

$$\alpha = A \cdot q^n, \quad (3.13)$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						47
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

де A – константа;

q – питомий тепловий потік.

Розрахунок випаровувальної ділянки теплообмінного апарата здійснюється методом ітерацій. В першому наближенні можна прийняти $\alpha = \alpha_2$.

Значення питомого теплового потоку в ітераціях розраховується за формулою при кипінні в об'ємі:

$$q = \frac{Q}{\pi \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot L}, \quad (3.14)$$

При кипінні теплоносія в трубах в рівняння (3.14) замість x_1 необхідно підставити $(x_1 - 2 \cdot \delta_{mp})$.

Після визначення значення питомого теплового потоку q коефіцієнт тепловіддачі з боку холодного теплоносія визначається за формулою (3.13).

3.3 Задача оптимізації економайзера та повітропідігрівача

Задачею оптимізації є розрахунок оптимального значення температури гарячого повітря та оптимальних значень температурних напорів на виході холодного теплоносія з економайзера та виході гарячого теплоносія з повітропідігрівача однокорпусного котельного агрегату типу ТГМП-324 паропродуктивністю $D = 263,9 \text{ кг/с} = 950 \text{ т/год.}$ при його роботі на мазуті в якості палива.

Регенеративний повітропідігрівач даного котельного агрегату виконано з двох частин – для течії гарячого теплоносія та для течії холодного теплоносія.

Задача оптимізації розв'язується для тієї частини повітропідігрівача, в якій рухається гарячий теплоносій.

Очевидно, що температура гарячого повітря набуватиме оптимального з економічної точки зору, якщо сумарні витрати на повітропідігрівач, економайзер, екрани, що розташовуються в топці котла, та паливо будуть мінімальними.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						48
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Умову мінімуму сумарних витрат в цьому випадку можна виразити у вигляді рівняння [10]:

$$\frac{\partial Z}{\partial t_{zn}} = P_{mn} \cdot \frac{\partial F_{mn}}{\partial t_{zn}} + P_{ek} \cdot \frac{\partial F_{ek}}{\partial t_{zn}} + P_{л} \cdot \frac{\partial F_{л}}{\partial t_{zn}} + P_n \cdot \frac{\partial B}{\partial t_{zn}},$$

де Z – сумарні затрати на повітропідігрівач, економайзер, екрани, що розташовуються в топці котла, та паливо, грн./(рік·°C);

t_{zn} – температура гарячого повітря в регенеративному повітропідігрівачі, °C;

P_{mn} – річні витрати на 1м² повітропідігрівача, грн./(рік·м²);

P_{ek} – річні витрати на 1м² економайзера, грн./(рік·м²);

$P_{л}$ – річні витрати на 1м² екранів, що включають в себе вартість поверхні нагріву разом з обмурівкою, обшивкою, каркасом, вартість монтажних робіт та витрати на тяго-дутьові машини грн./(рік·м²);

F_{mn} – площа поверхні нагріву повітропідігрівача, м²;

F_{ek} – площа поверхні нагріву економайзера, м²;

$F_{л}$ – площа поверхні нагріву екранів, м²;

P_n – приведені річні витрати на 1 кг натурального палива, (грн./рік)/(кг/с);

B – повна витрата палива, кг/с.

Якщо ввести скорочені позначення, то визначені чисельні значення наступних величин будуть такими:

$$\tau_1 = \left(\frac{C_z}{C_n} \right) \cdot t_{yx} - t_{xn} = 93,6^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = \frac{C_z}{C_n} \cdot \left[\left(\frac{C_{вод}}{C_{ek}} \right) \cdot (t'_{ek} - t_{жв}) - (t'_{ek} - t_{yx}) \right] - t_{xn} = 422,7^\circ\text{C};$$

$$\tau_3 = \left(\frac{C_z}{C_n} \right) \cdot (t_{жв} - t_{yx}) + t_{xn} = 206,1^\circ\text{C};$$

$$\frac{C_z}{C_n} = 1,1313;$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						49
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$r_p = 0,20;$$

$$\delta N_{\partial}^{nm} = 0,0056 \text{ кВт/м}^2;$$

$$\delta N_{\partial}^{ек} = 0,042 \text{ кВт/м}^2;$$

де C_2 – середня теплоємність масової витрати газів (продуктів згоряння палива) в повітропідігрівачі, віднесена до 1 кг палива, Дж/(кг·°C);

C_n – середня теплоємність масової витрати (водяного еквіваленту) повітря в повітропідігрівачі, віднесена до 1 кг палива, Дж/(кг·°C);

t_{yx} – температура газів (продуктів згоряння палива), що відходять, °C;

t_{xn} – температура холодного повітря на вході до повітропідігрівача, °C;

$C_{вод}$ – середня теплоємність масової витрати води в економайзері, віднесена до 1 кг палива, Дж/(кг·°C);

$C_{ек}$ – середня теплоємність масової витрати газів (продуктів згоряння палива) в економайзері, віднесена до 1 кг палива, Дж/(кг·°C);

$t_{ек}^l$ – температура газів (продуктів згоряння палива) на вході до економайзера, °C;

$t_{жсв}$ – температура живильної води, °C;

r_p – частка ре циркулюючого газу, який, зазвичай, відбирається після економайзера та подається в нижню частину топки;

δN_{∂}^{nm} - потужність, що витрачається на подолання супротиву газу (продуктів згоряння палива) та повітря на 1 м² поверхні нагріву повітропідігрівача, кВт/м²;

$\delta N_{\partial}^{ек}$ - потужність, що витрачається на подолання супротиву газу (продуктів згоряння палива) та повітря на 1 м² поверхні нагріву економайзера, кВт/м².

Вартість 1 м² нагріву економайзера, повітропідігрівача та екранів становить відповідно:

$$Ц_{ек} = 1794,5 \text{ грн./м}^2;$$

$$Ц_{nn} = 77,7 \text{ грн./м}^2;$$

$$Ц_{л} = 8510 \text{ грн./м}^2.$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						50
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Приймаємо, що, нормативний коефіцієнт запасу:

$$p_n = 0,12 \text{ 1/рік};$$

частка сумарних річних відрахувань від капіталовкладень в поверхні нагріву (на амортизацію, поточний ремонт та реновацію):

$$p_{aF} = 0,122 \text{ 1/рік};$$

частки відрахувань від капіталовкладень, що пов'язані з аварійними простоями:

$$\varphi_{ек} = 0,21 \text{ 1/рік};$$

$$\varphi_{nn} = 0;$$

$$\varphi_{л} = 0,12 \text{ 1/рік};$$

річні витрати на 1 кВт потужності тяго-дутьової установки, що містять в собі приведені капіталовкладення на збільшення потужності тяго-дутьової установки та інші витрати на виробництво електричної енергії, віднесені на 1 кВт потужності електродвигунів, грн./(кВтрік):

$$P_{\partial} = 2376,9 \text{ грн./(кВтрік)};$$

На основі наведених вище даних за формулами річних витрат на 1 м² поверхні нагріву, які визначаються за формулою:

$$P_F = C_F \cdot (p_n + p_{aF} + \varphi_F),$$

де C_F - вартість 1 м² нагріву економайзера, повітропідігрівача та екранів

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						51
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

відповідно, грн./м²;

ϕ_F - частки відрахувань від капіталовкладень, що пов'язані з аварійними простоями економайзера, повітропідігрівача та екранів відповідно, 1/рік;
та на основі річних витрат на 1 м² поверхні нагріву повітропідігрівача P_{nn} та економайзера $P_{ек}$, які визначаються за формулою:

$$P_{nn(ек)} = P_F + \delta N_{\delta}^{nn(ек)} \cdot P_{\delta},$$

де річні витрати на 1 кВт потужності тяго-дутьової установки з електроприводом можна визначити за наступною формулою:

$$P_{\delta} = \beta_n \cdot [K_{\delta} \cdot (p_n + p_{a\delta}) + K_e \cdot (p_n + p_{aN})] + C_n \cdot b_e \cdot \tau_e \cdot 10^{-6},$$

де β_n - нормативний коефіцієнт запасу, який включає запаси по витраті та тиску тяго-дутьових машин та потужності електродвигунів;

K_{δ} - питома вартість збільшення потужності димососів або вентиляторів, грн./кВт;

$p_{a\delta}$ - частка сумарних річних відрахувань від капіталовкладень в тяго-дутьове обладнання, 1/рік;

K_e - питома вартість потужності електростанції, що заміщується, грн./кВт;

p_{aN} - частка сумарних річних відрахувань від капіталовкладень в потужність електростанції, що заміщується, 1/рік;

C_n - вартість палива;

b_e - питома витрата умовного палива на електростанції, що заміщується, г/(кВтгод);

τ_e - приведена кількість годин роботи протягом року, год/рік;

$$P_{ек} = 910,2 \text{ грн.}/(\text{м}^2/\text{рік});$$

$$P_{nn} = 32,116 \text{ грн.}/(\text{м}^2/\text{рік});$$

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$P_{\text{л}} = 3078,4 \text{ грн./}(\text{м}^2/\text{рік}).$$

Далі за формулою

$$R_1 = \frac{\left(\frac{C_z}{C_n}\right) \cdot P_{nn}}{P_{\text{л}} \cdot \psi_{nn} \cdot k_{nn} \cdot (1 + r_p)},$$

$$R_2 = \frac{C_{\text{вод}}}{C_n} \cdot \frac{C_z}{C_n} \cdot \frac{P_{\text{ек}} \cdot (t'_{\text{ек}} - t_{\text{жсб}})}{P_{\text{л}} \cdot k_{\text{ек}} \cdot (1 + r_p)},$$

де ψ_{nn} - коефіцієнт переходу від протитечійної схеми руху теплоносія при загальному протитечійному включенні ходів трубчастого повітропідігрівача;

k_{nn} - коефіцієнт теплопередачі в повітропідігрівачі, кВт/(м²·°C);

$k_{\text{ек}}$ - коефіцієнт теплопередачі в економайзері, кВт/(м²·°C).

та формулою

$$a = (\tau_2 - \tau_3) - \frac{\tau_1 + R_1}{\frac{C_z}{C_n} - 1},$$

$$b = (\tau_3 - \tau_2) \cdot \frac{\tau_1 + R_1}{\frac{C_z}{C_n} - 1} - (R_2 + \tau_2 \cdot \tau_3),$$

$$c = \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \frac{\tau_1 + R_1}{\frac{C_z}{C_n} - 1} + \frac{\tau_1 \cdot R_2}{\frac{C_z}{C_n} - 1},$$

розраховуються значення коефіцієнтів:

$$R_1 = 201,0;$$

$$R_2 = 710900;$$

$$a = 2027;$$

$$b = -1284 \cdot 10^3;$$

$$c = 702,6 \cdot 10^6.$$

Підставляючи отримані дані послідовно в формули:

$$(t_{zn}^{onm})^3 + a \cdot (t_{zn}^{onm})^2 + b \cdot t_{zn}^{onm} + c = 0,$$

де t_{zn}^{onm} - оптимальне значення температури гарячого повітря в регенеративному повітропідігрівачі, °C;

$$t_{ек}^{//} = t_{yx} + \frac{C_n}{C_z} \cdot (t_{zn} - t_{xn}),$$

де $t_{ек}^{//}$ - температура газів (продуктів згоряння палива) на виході з економайзера, °C;

$$\Delta t_{ек onm}^{//} = t_{ек onm}^{//} - t_{жв},$$

$$\Delta t_{nn onm}^I = t_{ек onm}^{//} - t_{zn}^{onm},$$

остаточно можна отримати наступні значення:

$$t_{zn}^{onm} = 370^\circ\text{C};$$

$$t_{ек onm}^{//} = 410^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{ек onm}^{//} = 145^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{nn onm}^I = 40^\circ\text{C}.$$

Варто зазначити, що без урахування надійності роботи котельного агрегату (і відповідному зменшенні величин $P_{ек}$ та P_l) оптимальне значення температури

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						54
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

гарячого повітря в регенеративному повітропідігрівачі дорівнюватиме $t_{en}^{opt} = 326^{\circ}\text{C}$.

Відхилення температури гарячого повітря від оптимального значення на 25°C в той чи інший бік призводить в даному котельному агрегаті до перевитрати річних витрат приблизно на 2 %.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						55
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній роботі розглянуто декілька методів оптимізації теплообмінного обладнання, зокрема:

- метод градієнта, який є найбільш відомим прямим методом ітераційного розв'язання задач оптимізації;

- Extr-N метод, який є певною модифікацією метода градієнта та спробою покращити збіжність метода градієнта в околі мінімального значення критерію оптимізації, як і в методі градієнта передбачається, що початкове наближення для керування є заданим;

- метод квазілінеаризації, перевагами якого є простіше визначення початкового наближення розв'язку задачі оптимізації, ніж визначення початкового стан спряженої системи рівнянь задачі оптимізації, а також те, що метод квазілінеаризації є набагато менш чутливим щодо початкового наближення розв'язку оптимізаційної задачі.

Проте, в загальному випадку цей метод не може використовуватись для розв'язання задач оптимізації з обмеженим керуванням.

Для верифікації алгоритмів оптимізації щодо розв'язання задач методом градієнта, Extr-N методом та методом квазілінеаризації в роботі розв'язано наступні задачі:

- задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі;
- задача оптимального розподілу температури в трубчастому реакторі з теплообмінником поверхневого типу;
- задача оптимального керування хімічною реакцією в трубчастому реакторі;
- задача оптимізації конструкції кожухотрубного теплообмінника.

Результати аналізу верифікації алгоритмів оптимізації, розроблених на основі вищезазначених методів оптимізації, засвідчили їх адекватність та можливість застосування для розв'язання задач оптимізації, пов'язаних з процесами теплообміну навіть при наявності хімічних реакцій в середовищі

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						56
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

теплообмінного обладнання та сформульованих у вигляді диференціальних рівнянь з обмеженнями.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Хофер Э. Численные методы оптимизации / Э. Хофер, Р. Лундерштедт.- М.: Машиностроение, 1981.- 192с.
2. Жовтонога М.М. Використання програмних продуктів COMSOL MULTIPHYSICS®, MATLAB®, SIMULINK® та SIMSCAPE™ при розв'язанні задач гідрогазодинаміки та тепло масообміну: навчальний посібник / М.М. Жовтонога, А.С. Попова, В.О. Перцевий. - Дніпропетровськ: Ліра, 2016.- 108с.
3. Optimal cooling of a tubular reactor [електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.comsol.com/model/download/391161/models.chem.optimal_cooling.pdf (дата звернення: 24.06.17). – Назва з екрана.
4. Димніч А.Х. Теплопровідність / А.Х. Димніч, О.А. Троянський.- Донецьк: Норд- Пресс, 2004.- 370с.
5. Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки в металургії / М.П. Ревун, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанський, О.В. Бородулін.- Запоріжжя: ЗДІА.- 2002.- 438с.
6. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2 кн. / Г Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. М.: Мир, 1986. Кн. 2. 320 с.
7. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров.- М.: Химия, 1969.- 283 с.
8. Edgar T.F. Optimization of chemical processes / T.F. Edgar, D.M. Himmelblau, L.S. Lasdon.- New York: McGraw-Hill, 2001.- 667p.
9. Методы оптимизации параметров теплообменных аппаратов / А.Н. Иоселиани, А.А. Михалевич, В.Б. Нестеренко, М.Е. Салуквадзе.- Мн.: Наука и техника, 1981.- 144с.
10. Андриященко А.И. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС: учебное пособие для теплоэнергетических специальностей вузов / Андриященко А.И., А.В. Змачинский, В.А. Понятов.- М.: Высшая школа, 1974.- 280с.

					02.15.EE2221.KPM.2023-ПЗ	Лист
						58
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		