

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

**Фізико-математичний факультет  
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла**

---

«На правах рукопису»

УДК 535.2; 535,8

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій КОТОВСЬКИЙ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-науковою програмою  
«Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»  
зі спеціальності 104 – «Фізика та астрономія»**

на тему: **« Керування фізичними процесами в вентиляційно рекупераційних системах »**,

Виконав: студент VI курсу, групи ОФ-81мн  
(шифр групи)

Скаченко Віталій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д. ф.-м. н., проф. Решетняк Сергій Олександрович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Консультант с.н.с., к.ф.-м.н. Скірта Юрій Борисович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Рецензент д. ф.-м. н., проф. Горобець Оксана Юріївна  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2020 року

## АНОТАЦІЯ

### ДО ЗВІТУ З МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

СТУДЕНТА ФМФ, 2 КУРСУ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ГР. ОФ-81МН

Віталій Скаченко

(ім'я та прізвище)

**На тему** «Керування фізичними процесами в вентиляційно-рекупераційних системах»

**Науковий керівник** проф. КЗЕФ, д.ф.-м.н., професор Сергій РЕШЕТНЯК

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ім'я та прізвище)

**Актуальність теми:** через подальше зростання кількості систем вентиляції та підвищення нормування характеристик повітря є нагальна необхідність в оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання та необхідність зменшення витрат енергії в системах активної вентиляції приміщень та необхідність розробки зручних систем керування цими процесами.

**Об'єкт дослідження:** рекупераційно-вентиляційні системи.

**Предмет дослідження:** фізичні процеси у рекупераційно-вентиляційних системах.

**Мета роботи:** мета даної роботи полягає у розробці експериментальної моделі пластинчастого теплообмінника та аналізу факторів впливу на ефективність роботи вентиляційно-рекупераційних систем. Розробити програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі.

**Методи дослідження:** комп'ютерне моделювання фізичних процесів у середовищі C++, дослідження якості повітря за допомогою датчика MQ135.

**Відомості про обсяг звіту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних джерел:** обсяг звіту - 82 сторінки: рисунків - 45 , використаної літератури – 53.

**Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати:** розробити електронну схему керування процесом вентиляції в модельованому приміщенні та програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі. При виконанні цих завдань було задіяно комп'ютерне моделювання фізичних процесів у середовищі C++ та

дослідження якості повітря за допомогою датчика MQ135. Після виконаних всіх задач було розроблено метод контролю роботи рекупераційно-вентиляційних систем за допомогою нового оригінального програмного забезпечення. Дані результати отримані в магістерській роботі є важливими для подальших робіт при оптимізації енерговитрат, використовуючи подібне обладнання для енергозберігаючої вентиляції приміщення.

***Перелік ключових слів:*** теплообмінник пластинчастий, теплоносій, поверхня теплообміну, нерозбірний пластинчастий теплообмінник, пакет пластин, експериментальна модель, програмне забезпечення.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

## SUMMARY

### TO THE MASTER'S DISSERTATION REPORT

STUDENT OF FMF, 2 COURSE OF THE MASTER LEVEL, GR. OF-81mn

Vitaliy Skachenko

( name and surname)

**On the topic** "Management of physical processes in ventilation and recuperation systems"

**Scientific supervisor** prof. DGEP, Ph.D., Professor Serhiy RESHETNYAK

(scientific degree, academic status, position, name and surname)

**Topicality:** due to further growth in the number of ventilation systems and increasing the standardization of air characteristics, there is an urgent need to optimize the operation of ventilation equipment and the need to reduce energy consumption in active ventilation systems and the need to develop convenient control systems.

**Object of research:** recuperation and ventilation systems.

**Subject of research:** physical processes in recuperation and ventilation systems.

**Purpose of work:** he purpose of this work is to develop an experimental model of a plate heat exchanger and analysis of factors influencing the efficiency of ventilation

and recovery systems. Develop software to control the physical processes of coolant transfer in the recuperator.

***Research methods:*** computer simulation of physical processes in C ++ environment, air quality research using MQ135 sensor.

**The article contains:** used literature - 53, pages: - 82, pictures - 45

***The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained:***to develop an electronic control circuit for the ventilation process in the simulated room and software to control the physical processes of heat transfer in the recuperator. These tasks involved computer simulations of physical processes in a C ++ environment and air quality studies using the MQ135 sensor. After completing all the tasks, a method was developed to control the operation of recuperation and ventilation systems using new original software. These results obtained in the master's thesis are important for further work in the optimization of energy consumption, using similar equipment for energy-saving ventilation.

**Keywords:**plate heat exchanger, heat carrier, heat exchange surface, non-demountable plate heat exchanger, plate package, experimental model, software .

*Signature of the head*\_\_\_\_\_

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

**Фізико-математичний факультет  
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 104 «Фізика та астрономія»

Освітньо-наукова програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій КОТОВСЬКИЙ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію**

студенту \_\_\_\_\_ Скаченку Віталію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема дисертації:** «Керування фізичними процесами в вентиляційно-рекупераційних системах»,

**науковий керівник** д. ф.-м. н., проф. Решетняк Сергій Олександрович

затверджені наказом по університету від №891-с від 17.03.2020

**2. Термін подання студентом дисертації:** 13.05.2020.

**3. Об'єкт дослідження:** рекупераційно-вентиляційні системи.

**4. Предмет дослідження:** фізичні процеси у рекупераційно-вентиляційних системах.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** провести літературний аналіз за темою дисертації, дослідження стану проблеми; розробити експериментальну модель пластинчастого теплообмінника та модель середовища в якому будемо використовувати; запропонувати оптимізаційну конструкцію теплообмінного апарату; практична реалізація розробленої конструкції теплообмінника пластинчастого; розробити електронну схему керування процесом вентиляції в модельованому приміщенні; розробити програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі.

**6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

рисунок 2.6 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія;

рисунок 2.7 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія;

рисунок 2.8 – Ефективність теплообмінника в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія;

рисунок 2.9 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія;

рисунок 2.10 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від вхідної температури холодного теплоносія;

рисунок 2.11 – Ефективність теплообмінника в залежності від вхідної температури холодного теплоносія;

рисунок 2.12 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати гарячого теплоносія;

рисунок 2.13 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати гарячого теплоносія;

рисунок 2.14 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати гарячого теплоносія;

рисунок 2.15 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати холодного теплоносія;

рисунок 2.16 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати холодного теплоносія;

рисунок 2.17 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати холодного теплоносія;

рисунок 2.18 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв;

рисунок 2.19 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв;

рисунок 2.20 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв;  
 рисунок 3.14 – Схema експериментального стенда;  
 рисунок 3.15 – Модель приміщення;  
 рисунок 3.16 – залежності температури повітря в експериментальному стенді від часу при роботі релейного стабілізатора температури;  
 рисунок 3.17 – Залежності температур від часу;  
 рисунок 3.18 – Побудова пластинчастого рекуператора;  
 рисунок 3.19 – Схema стенда для вимірювання температури;  
 рисунок 3.20 – Головне вікно програми TCalc;  
 рисунок 3.21 – Основне вікно програми I7019;  
 рисунок 3.22 – Основне вікно програми Thermometer;  
 рисунок 3.23 – Вікно для безпосереднього керування виходами контролера.

**7. Орієнтований перелік публікацій:** “Ефективне керування процесами теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах”, “Автоматизований контроль процесів в рекупераційно-вентиляційних системах”.

#### **8. Консультанти розділів дисертації:**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 2	Скирта Ю.Б., с.н.с., к.ф.-м.н. ІМаг НАН та МОН України	10.10.19	15.03.20
Розділ 3	Скирта Ю.Б., с.н.с., к.ф.-м.н. ІМаг НАН та МОН України	15.10.19	20.03.20

**9. Дата видачі завдання:** 02.09.2019

#### **Календарний план**

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці.	02.09.2019 - 04.09.2019	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи	05.09.2019 - 06.09.2019	Виконано
3	Перегляд літературних джерел,	09.09.2019 - 04.10.2019	Виконано

	складання огляду літератури.		
4	Пошук і добір фактичних матеріалів.	07.10.2019 - 01.11.2019	Виконано
5	Побудова експериментальної установки та її вдосконалення.	04.11.2019 - 01.03.2020	Виконано
6	Підготовка розділів на основі експериментальних даних	02.12.2019 - 27.12.2019	Виконано
7	Аналіз експериментальних результатів.	30.12.2019 - 31.01.2020	Виконано
8	Групування та систематизація матеріалів.	03.02.2020 – 20.02.2020	Виконано
9	Виконання індивідуального завдання. Підготовка звіту з практики	21.02.2020 - 03.03.2020	Виконано
10	Складання заліку з науково-дослідної практики	03.03.2020 - 06.03.2020	Виконано
11	Аналіз отриманих результатів	07.03.2020 - 15.03.2020	Виконано
12	Підготовка розділів магістерської дисертації на основі отриманих даних по темі магістерської дисертації	16.03.2020 - 25.03.2020	Виконано
13	Оформлення розділів магістерської дисертації за вимогами	26.03.2020 - 27.03.2020	Виконано
14	Надання роботи на перевірку науковому керівнику	01.04.2020 – 12.04.2020	Виконано
15	Виправлення зауважень керівника	13.04.2020-17.04.2020	Виконано
16	Підготовка презентації та виступу для захисту	18.04.2020-24.04.2020	Виконано
17	Подання анотації магістерської дисертації на сайт кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла	27.04.2020 - 11.05.2020	Виконано
18	Надання роботи на перевірку науковому керівнику	28.04.2020	Виконано
19	Перевірка магістерської дисертації на плагіат	02.05.2020-06.05.2020	Виконано
20	Проведення попередньої доповіді з	08.05.2020	Виконано

	науковим керівником		
21	Отримання відгуку наукового керівника	08.05.2020	Виконано
22	Подання магістерської дисертації на рецензію	10.05.2020	Виконано
23	Здача магістерської дисертації на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення)	11.05.2020	Виконано
24	Попередній захист магістерської дисертації	13.05.2020	Виконано
25	Остаточний захист магістерської дисертації	22.05.2020	Виконано
26	Відсилання матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики ФТТ	22.05.2020	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

В.С. Скаченко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

С.А. Решетняк

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Актуальність теми через подальше зростання кількості систем вентиляції та підвищення нормування характеристик повітря є нагальна необхідність в оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання та необхідність зменшення витрат енергії в системах активної вентиляції приміщень та необхідність розробки зручних систем керування цими процесами.





Об'єкт дослідження рекупераційно-вентиляційні системи.

Предмет дослідження фізичні процеси у рекупераційно-вентиляційних системах.

Мета роботи полягає у розробці експериментальної моделі пластинчастого теплообмінника та аналізі факторів впливу на ефективність роботи вентиляційно-рекупераційних систем. Розробити програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі.

Методи дослідження комп'ютерне моделювання фізичних процесів у середовищі C++, дослідження якості повітря за допомогою датчика MQ135.

**Задачі дослідження:**

-  розробити експериментальну модель пластинчастого теплообмінника;
-  практична реалізація розробленої конструкції теплообмінника пластинчастого;
-  розробити електронну схему керування процесом вентиляції в модельованому приміщенні;
-  розробити програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі.

Наукова новизна одержаних результатів розроблений метод контролю роботи рекупераційно-вентиляційних систем за допомогою нового, оригінального програмного забезпечення.

Практичне значення одержаних результатів отримані в магістерській роботі результати є важливими для подальших робіт при оптимізації енерговитрат, використовуючи подібне обладнання для енергозберігаючої вентиляції приміщення.

Публікації 1.Тези на тему «Ефективне керування процесами теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах» до XVIII Міжнародної молодіжної

науково-практичної конференції «Історія розвитку науки, техніки та освіти» за темою «Людина у світі високих технологій». – Київ, 23 квітня 2020 року.

2.Тези на тему «Автоматизований контроль процесів в рекупераційно-вентиляційних системах» до IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні наукові інновації» Київ, 15 квітня 2020 року.

**Ключові слова** теплообмінник пластинчастий, теплоносій, поверхня теплообміну, нерозбірний пластинчастий теплообмінник, пакет пластин, експериментальна модель, програмне забезпечення.

**В роботі наведено:** використаної літератури – 55, сторінок – 84, рисунків – 48.

## **ABSTRACT**

**Actuality of theme** due to further growth in the number of ventilation systems and increasing the standardization of air characteristics, there is an urgent need to optimize the operation of ventilation equipment and the need to reduce energy consumption in active ventilation systems and the need to develop convenient control systems for these processes.

**Object of research** recuperation and ventilation systems.

**Subject of research** physical processes in recuperation and ventilation systems.

**Purpose of work** the purpose of this work is to develop an experimental model of a plate heat exchanger and analysis of factors influencing the efficiency of ventilation and recovery systems. Develop software to control the physical processes of coolant transfer in the recuperator.

**Research methods** computer modeling of physical processes in the C ++ environment, research of air quality by means of the MQ135 sensor.

### **Tasks of research**

- to develop an experimental model of a plate heat exchanger;
- practical implementation of the developed design of the plate heat exchanger;
- develop an electronic control circuit for the ventilation process in the simulated room;
- to develop software for control of physical processes of heat carrier transfer in the recuperator;

**Scientific novelty of the results** the obtained results developed a method of controlling the operation of recuperation and ventilation systems using new original software;

**Scientific novelty of the results** the results obtained in the master's thesis are important to further optimize energy consumption when using similar equipment for energy-saving ventilation.

**Publications** 1. Abstracts on "Effective management of heat transfer processes in recuperation and ventilation systems" to the XVIII International Youth Scientific and Practical Conference "History of Science, Technology and Education" on "Man in the world of high technology." – Kyiv, April 23, 2020. 2. Abstracts on "Automated process control in recuperation and ventilation systems" to the IV International scientific-practical conference "Modern scientific innovations" Kyiv, April 15, 2020.

**Keywords** plate heat exchanger, heat carrier, heat exchange surface, non-demountable plate heat exchanger, plate package, experimental model, software.

**The article contains:** used literature – 53, pages – 84, pictures – 48.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ I. ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ І ТЕПЛОПЕРЕДАЧ.....	12
1.1 Основні визначення і положення .....	12
1.2 Теплоносії.....	13
1.2.1 Холодні теплоносії.....	13
1.2.2 Гарячі теплоносії.....	14
1.3 Способи передачі тепла .....	16
1.4 Механізми передачі тепла через плоску стінку.....	17
1.5 Теплова ізоляція теплообмінників і теплообмінних апаратів .....	21
Висновки до I-го розділу .....	25
РОЗДІЛ II. СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ.....	27
2.1 Призначення і класифікація теплообмінних апаратів.....	27
2.2 Теплообмінники із листів .....	31
2.3 Види розрахунків теплообмінного обладнання.....	35
2.3.1 Алгоритм теплового розрахунку .....	36
2.3.2 Конструктивний розрахунок .....	38
2.4 Результати перевірного теплового розрахунку теплообмінника.....	39
Висновки до II-го розділу.....	51
РОЗДІЛ III. АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ.....	52
3.1 Комплектуючі елементи для побудови моделі.....	52
3.2 Будова моделі та принцип роботи.....	60
3.3 Програмне забезпечення для розрахунку та роботи з рекуператором .....	65
Висновки до III-го розділу.....	76
ВИСНОВКИ .....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

## ВСТУП

XXI століття – це вік еволюції та модернізації застарілих технологій, створення та застосування нових винаходів. Основною метою цих розробок є отримання високої продуктивності праці людини та зменшення шкідливого впливу при мінімальному використанні енергоресурсів. Вплив технічної еволюції доторкнувся і до вентиляційно-рекуперативних систем. Нині нікого не здивуєш вентиляцією на підприємствах, цехах, офісах, навіть у житлових будинках. Вона є ключовим фактором організації сприятливого мікроклімату в кімнатах будь-якого призначення. З 1918 року всі підприємства зобов'язали встановлювати вентиляційну систему, без цієї умови не допускали до експлуатації промислові підприємства, а через 70 років був запроваджений стандарт якості повітря [1-3].

Протягом останніх 50 років вимоги до вентиляції зросли. Якщо раніше все обмежувалося звичайним провітрюванням, то зараз є потреба в автоматизованій системі контролю мікроклімату в приміщеннях. Одним з найкращих і головних засобів заощадження тепла в вентиляційних системах є рекуператор. Рекуператор – один з видів теплообмінного апарата, який дозволяє зменшити тепловтрати в системі вентиляції [4].

Теплообмінні апарати застосовуються для різних процесів, а саме випаровування, охолодження і нагрівання, очищення повітря. Актуальність теми полягає через подальше зростання кількості систем вентиляції та підвищення нормування характеристик повітря є нагальна необхідність в оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання. Споживання електроенергії вентиляційними установками є значним так як велика частина останніх є застарілою та працює не в енергоефективних режимах. На основі моделювання установки є можливість виявити найбільш раціональні режими для того чи іншого типу навантаження з використанням методів прогнозування енергоспоживання та його регулювання засобами автоматики [5].

Мета даної роботи полягає у розробці експериментальної моделі пластинчастого теплообмінника та аналізу факторів впливу на ефективність

роботи вентиляційно-рекупераційних систем. Розробити програмне забезпечення контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі.

## РОЗДІЛ І. ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ І ТЕПЛОПЕРЕДАЧ

### 1.1 Основні визначення і положення

У наш час у багатьох галузях промисловості, а особливо медичній, хімічній, гірничодобувній, енергетичній і сільському господарстві використовується процес теплообміну. Основною метою цього процесу є:

- зрідження газів;
- охолодження (нагрітих) та нагрівання (холодних) теплоносіїв;
- очищення повітря;
- конденсація;
- кристалізація;
- плавлення тіл;
- випаровування різних рідин тощо.

Теплообмінниками називають прилади, в яких проходять процеси теплообміну. Процес теплообміну – це фізичний процес передавання енергії у вигляді деякої кількості теплоти від тіла з більшою температурою (гарячий теплоносій) до тіла з меншою температурою (холодний теплоносій).

Теплоносій – це тіло або середовище, яке безпосередньо залучене до процесу теплообміну. Тіло або робоче середовища, яке має вищу температуру, прийнято називати гарячим теплоносієм. Тіло або робоче середовища, яке має нижчу температуру, прийнято називати холодним теплоносієм. Основною властивістю цих теплоносіїв є передавання теплової енергії від гарячого теплоносія до холодного теплоносія, під час передачі енергії температура гарячого теплоносія зменшується, а відповідно, холодного збільшується. Зрозуміло, що в решті-решт, буде однакова температура на обох носіях, але вона існує лиш теоретично. На процес обміну енергії між гарячим та холодним теплоносієм діє рушійна сила.

Із законів термодинаміки знаємо, що перенесення тепла від гарячих теплоносіїв до холодних теплоносіїв відбувається поступово до того часу, доки є

позитивна різниця температур між ними. Тепловим потоком називають передачу або прийняття тепла теплоносієм у процесі теплопередачі за певну одиницю часу.

Теплообмінники працюють в різних умовах, а саме під різними тисками ( $10 \cdot 10^6$  Па), температурами ( $-260^\circ\text{C}$  до  $9999^\circ\text{C}$ ) і навіть у глибокому вакуумі. Із цього зрозуміло, що не кожний матеріал витримає такі умови, тим паче у теплообмінниках часто знаходяться корозійно активні середовища, тому потрібно уважно враховувати всі характеристики матеріалу. Особливу увагу потрібно приділяти поверхні теплопередачі. Поверхнею теплопередачі є пластинка або трубка, площа якої має контакт із теплоносіями, а саме по якій відбувається передача тепла від гарячого до холодного теплоносія. Покроковий процес передачі в границях однорідної фази із потоку гарячого теплоносія і до поверхні передачі називається тепловіддачею, а теплопередача – це повний процес передачі тепла від потоку гарячого теплоносія через проміжну стінку в холодний теплоносій [6-9].

## **1.2 Теплоносії**

На виробництвах і в побуті використовують велику кількість різних гарячих і холодних теплоносіїв, вибір яких залежить від характеру виробництва та властивостей самого теплоносія. Розрізняють два види гарячих теплоносіїв: прямі, непрямі. До прямих теплоносіїв належить електричний струм, димові гази. Особливістю їх є те, що вони утворюються у процесі теплообміну, на відміну від непрямих, які створюються шляхом нагріву від прямих теплоносіїв. Водяна пара, розчини солей, гарячі гази, розплави солей та металів, рідини, пари різних речовин відносять до типу непрямих теплоносіїв. До властивостей холодних теплоносіїв входить охолоджувати гарячі теплоносії, при цьому нагріватися самому [7-9].

### **1.2.1 Холодні теплоносії**

Найпоширенішими із речовин, які застосовують у холодних теплоносіях, є вода і повітря, так як у наш час є зменшення кількості води, тому частіше намагаються використовувати повітря. Але теплоносій повітря має декілька своїх

недоліків, які не дають великий коефіцієнт теплопередачі, а саме невелика густина та низька теплоємність, що призводить до затрат великого об'єму повітря, тому природний режим є малоефективним. При механічному режимі не сильно змінюється ситуація, хоча і потік повітря збільшують за допомогою вентиляторів, які в свою чергу витрачають великий обсяг електроенергії, але коефіцієнт не буде більший за  $39 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ . Тому на великих підприємствах використовують теплообмінники з великою площею металічної поверхні від 1000 до 10000 м<sup>2</sup>.

Вода є кращим теплоносієм за повітря саме через високий коефіцієнт теплопровідності і теплоємності, який здобувається за допомогою примусового руху води в теплообміннику. Вода як теплоносій використовується у поверхневих теплообмінниках. Для цього на великих підприємствах використовується велика кількість води, але при цьому запас води в світі з роками зменшується. Тому підприємства перейшли на використання теплообмінників із замкнутою системою, тобто воду використовують по декілька раз [10].

### 1.2.2 Гарячі теплоносії

Гарячі теплоносії часто використовують у нафтопереробних та хімічних виробництвах. Температура гарячого – нагрівального теплоносія – вища за навколишнє середовище, тому він охолоджується за рахунок того, що віддає тепло. Так відбувається процес теплообміну [9].

В залежності від умов використання теплоносія на виробництві, здійснюється його вибір, відштовхуючись від таких властивостей, як теплофізичні властивості речовини, її температурний діапазон застосування. Враховуються умови безпеки виробництва, і самого теплоносія. Так як теплообмінна установка, використання теплоносіїв, витрати на обладнання потребують фінансових затрат, тому важливі і економічні міркування під час вибору.

Найпоширенішим серед гарячих теплоносіїв є водяна пара. Властивості водяної пари дозволяють легко транспортувати її як на короткі, так і далекі відстані у трубопроводах. Вона не є токсичною. Питома теплота конденсації

водяної пари  $2,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , що набагато вища за питому теплоту конденсації інших речовин при атмосферному тиску. Найбільш часто цей вид теплоносія застосовується при температурах від 99 до 199 °С. Такий діапазон температур відповідає тиску горючої пари 0,1-1,6 МПа. Регулювання температури у системі відбувається зміною тиску. Властивості водяної пари забезпечують рівномірність обігрівання. Розрахування товщини стінок корпусів теплообмінників безпосередньо пов'язане з величиною майбутнього тиску. Так при температурах, вищих за 199 °С, тиск у теплообмінних системах хімічних виробництв становить більше 1,6 МПа.

У наш час більшість великих підприємств будують власну ТЕЦ, за допомогою якої одержують водяну пару. В основному такий засіб одержання водяної пари практикують у різних галузях промисловості. Але на установках, де водяна пара утворюється при утилізації тепла хімічних реакцій або ядерних реакцій, її можуть використовувати як теплоносій. Випарювання деяких розчинів солей дає вторинну пару тиском 0,1-0,5 МПа і цей побічний продукт також застосовують в якості теплоносія з використанням термокомпресійної установки компресорного або ежекторного типу, якщо даного показника тиску вторинної пари не достатньо.

В температурному діапазоні до 245-380°С застосовуються пари висококиплячих органічних теплоносіїв. Застосування їх вигідно тим, що кипіння та випарювання цих видів теплоносіїв відбувається при невисокому тиску, який коливається у діапазоні від 0,1 до 0,8 МПа.

Даутерм А – дифенільна суміш, яка є одним з таких теплоносіїв, що використовують найбільш часто. До її складу входить дифеніловий ефір та дифеніл у розмірі 7% і 26% відповідно. Даутерм А має більшу ніж пара води густину, тому кількість тепла, яке виділяється з 1 м<sup>3</sup>, приблизно така сама, навіть не зважаючи на меншу теплоту конденсації більше ніж у 8 разів. Високі показники коефіцієнта тепловіддачі – 1399-1699  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$  досягаються тому, що не утворюється плівка конденсату на поверхні стінок.

Для отримання пари використовують індивідуальні котлові установки. Випарник жаротрубного котла, встановлений в піч, підігрівається газом, мазутом або нафтою. У ньому утворюється пара. Далі, проходячи через теплообмінний апарат, пара конденсується, віддаючи тепло холодному теплоносію, а потім повертається назад в паровий котел.

Використання рідкого Даутерму А, а також його пари, вимагає застосування спеціальних матеріалів у виготовленні прокладок та фланцевих з'єднань, через його високу текучість. Але при виборі теплообмінників Даутерм А має велику перевагу у зв'язку із тим, що не викликає корозії вуглецевої сталі.

Установка циркуляційного типу оснащена насосами, які змушують рідину циркулювати по замкненому контуру: у теплообміннику рідина нагріває холодний теплоносій, потім у котлі рідина сама нагрівається від прямих теплоносіїв. Такого типу установки використовують для нагріву технологічних середовищ.

Різні рідини використовують як гарячі теплоносії, такі як, воду, перегріту і під тиском, дифенільну суміш, гліцерин, мінеральні масла, розчини гліцерину, нафту і нафтопродукти, розплави солей, розплави легкоплавких металів. Вибір рідини залежить від того, який температурний діапазон має холодний теплоносій. Для нагрівання до температур 150-205°C використовують нафту та мінеральні масла. Недолік цих матеріалів в низькому коефіцієнті теплопередачі та забрудненні поверхні теплообміну. Перевага у тому, що вони менш затратні. При виборі гарячого теплоносія враховується температура спалаху пари. Також важливо враховувати температуру термічного розкладання або початку окиснювання[7-9].

### **1.3 Способи передачі тепла**

Тепло в просторі передається декількома способами, а саме:

- Випромінюванням – у процесі передачі теплової енергії засобами електромагнітної радіації або фотонами у певному діапазоні довжин хвиль у рідинах, твердих тілах або газах [11]. Головними властивостями середовища, в

якому відбувається процес теплопередачі, мають бути неповна або повна прозорість щодо променистої енергії [12];

- Теплопровідністю – передача внутрішньої енергії під час контактної взаємодії структурних частинок речовини (атомів, іонів, молекул, вільних електронів) між собою під впливом різниці температур, агрегатного стану речовини та певного руху мікрочастинок [12]. Рух атомів у твердих тілах є специфічним – частинки роблять тільки зворотно-коливальні рухи в просторі кристалічної решітки, у газоподібних речовинах та рідинах спостерігається хаотичний рух молекул, який підпорядковується молекулярно-кінетичному механізму. У первозданному вигляді теплопровідність відбувається у твердих тілах та у сталих (приграничних) тонких шарах рідини й газу [11];

- Конвекцією – за допомогою процесів транспортування й змішування макроскопічних об'ємів теплоносія в неоднорідному температурному полі. У певних випадках (наприклад, під впливом різниці щільності тощо) транспортування об'ємів середовища може відбутися ненароком. Такий вид конвенції має назву вільна. На противагу цьому виду існує примусова конвенція, яка відбувається у випадку транспортування, на яке діють зовнішні сили (наприклад, сили інерції, тиску тощо) [12].

Для передачі тепла в промислових, природніх процесах використовують складний теплообмін. Складний теплообмін – це використання одночасно теплопровідності та конвекції, в загальному – використання одночасно декількох способів.

#### **1.4 Механізми передачі тепла через плоску стінку**

Даний механізм складається з трьох стадій:

- перша стадія – це конвекції від гарячого теплоносія до стінки (поверхні теплопередачі);
- друга стадія – це теплопровідність;

- третя стадія – це конвекції від стінки (поверхні теплопередачі) до холодного теплоносія [13-15].

Маємо теплообмінник з плоскою стінкою між теплоносійми з товщиною стінки –  $d$ , температурою гарячого теплоносія  $t_1$  і холодного теплоносія  $t_2$ , коефіцієнтом теплопровідності –  $\lambda$ , температура змінюється від  $t_{ст1}$  до  $t_{ст2}$ , а саме ( $t_{ст1} > t_{ст2}$ ). Робимо розрахунок теплопередачі.



Рисунок 1.1 – Одношарова плоска стінка пластинки між теплоносійми [12]

Перша стадія описується рівнянням [16]:

$$Q = \alpha_1 \cdot F(t_1 - t_{ст1}), \quad (1.1)$$

Друга стадія [16]: Із рівняння Фур'є ми знаємо, що кількість теплоти у твердих тілах, яка проходить через стінку площею  $F$  при стаціонарному режимі, можна записати як:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F, \quad (1.2)$$

Де після розділення змінних інтегруємо рівняння (1.2) у відповідних граничних умовах.

$$Q = \int_{x=0}^{x=d} dx = -\lambda F \int_{t_{ст1}}^{t_{ст2}} dt, \quad (1.3)$$

Після інтегрування рівняння (1.3) отримуємо рівняння теплопровідності, яке і буде описувати другу стадію.

$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot F(t_{ст1} - t_{ст2}), \quad (1.4)$$

Третя стадія описується рівнянням [16]:

$$Q = \alpha_2 \cdot F(t_{ст2} - t_2), \quad (1.5)$$

Після спільного розв'язання рівнянь (1.1, 1.4, 1.5) отримуємо такий результат:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F(t_1 - t_2) = KF(t_1 - t_2). \quad (1.6)$$

де  $K = \frac{1}{R}$ , а  $R$  дорівнює сумі знаменника і має назву термічний опір.

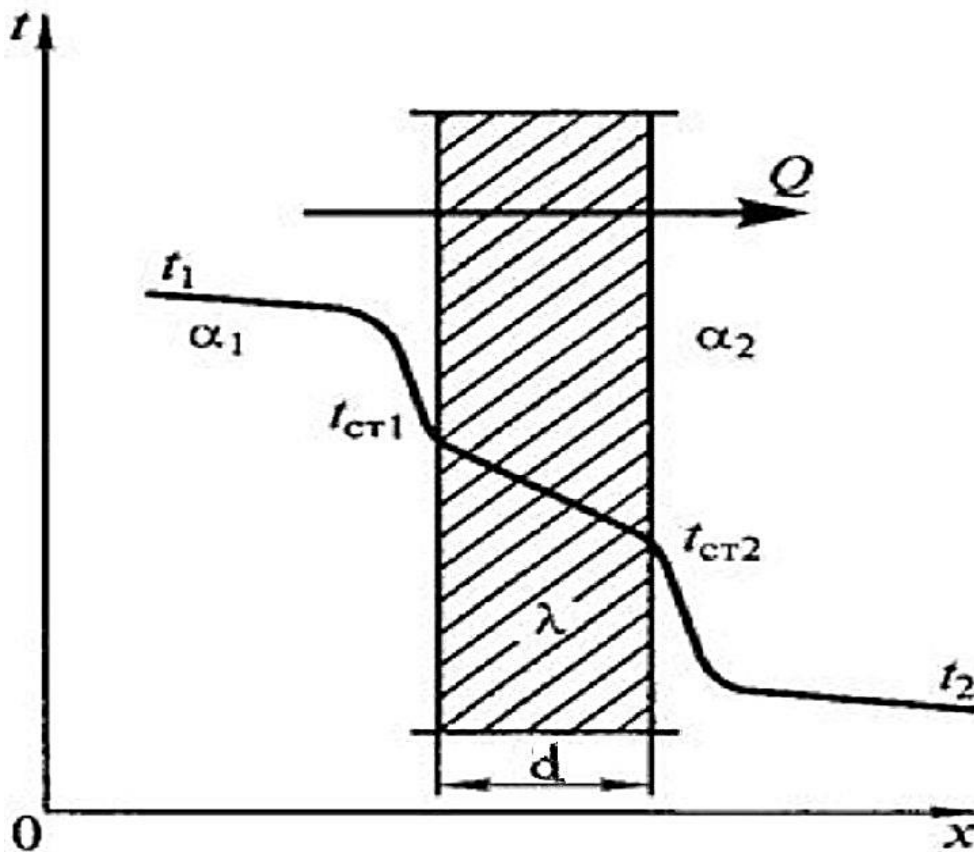


Рисунок 1.2 – Схема розрахунку теплопередачі для випадку з плоскою поверхнею [16]

$Q$  – кількість теплоти, що проходить через плоску пластину;

$d$  – товщина плоскої стінки;

$\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі першого робочого середовища (тіла);

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі другого робочого середовища (тіла);

$t_1$  – температура першого робочого середовища (тіла), де знаходиться гарячий теплоносій;

$t_2$  – температура другого робочого середовища (тіла), де знаходиться холодний теплоносій;

$t_{ст1}$  – температура на межі першої стінки, яка знаходиться біля гарячого теплоносія;

$t_{ст2}$  – температура на межі другої стінки, яка знаходиться біля холодного теплоносія;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу із якого вироблена плоска стінка.

Для багат шарової плоскої стінки при сталому тепловому режимі рівняння теплопровідності буде мати такий вигляд :

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} \cdot F ( t_1 - t_2 ) \quad (1.7)$$

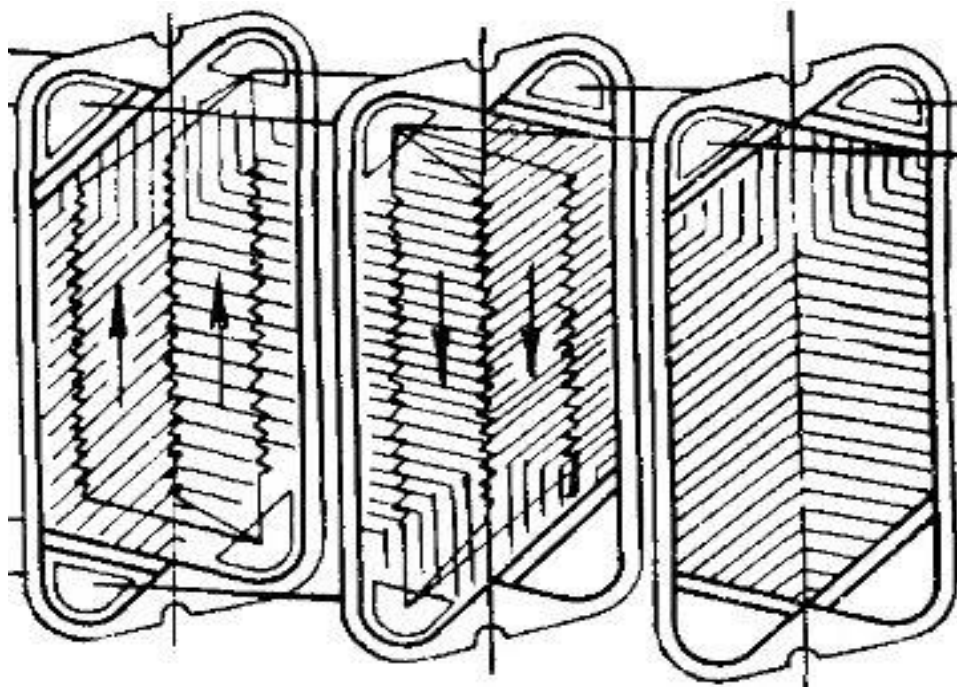


Рисунок 1.3 – Багатошарові плоскі пластинки між теплоносіями [17]

В теплообмінних апаратах в ході теплопередачі головним завданням під час розрахунку процесів є знаходження загальної кількості переданого тепла через швидкості у кожній із стадій [18-21].

### **1.5 Теплова ізоляція теплообмінників і теплообмінних апаратів**

Трубопроводи та промислові теплообмінні апарати покривають теплоізоляцією для того, щоб зменшити втрати тепла, яке виділяється від них в навколишнє середовище, та енерговитрати, а також для обмеження припливу тепла до апаратних установок з низькими температурами з навколишнього середовища. При цьому використовують різні види матеріалів для теплоізоляції та застосовують різні способи її створення та розміщення її на теплообміннику.

Важливим фактором при виборі ізолюючого матеріалу є температурний діапазон, для цього матеріалу, та його теплозахисні властивості. Також враховується температура зовнішньої стінки ізолюючого апарата. В якості теплоізоляційних матеріалів виступають:

- ✚ Керамзит – його основні властивості стійкість до вологи та різних механічних впливів, екологічність матеріалу, також не поступається своєю міцністю та стійкістю [22-23].
- ✚ Пінопласт – найбільш поширений ізолюючий матеріал через свою ціну та маленьку масу, щільність, водостійкість. Є майже не вразливим до грибків та цвілі, довготривалим, але при потраплянні сонячних променів починає руйнуватися [22-23].
- ✚ Мінеральна вата, до якої входять інші різновиди вати, відрізняються між собою лиш сировиною, із якої виготовляють:
  - скловата – із розплавленого скла;
  - кам'яна вата – із розплавлених гірських порід;
  - шлаковата – із доменних шлаків [22-23].



Рисунок 1.4 – Зразок мінеральної вати [23]

Однією із позитивних особливостей є стійкість до великих температур, має хороший рівень паропроникності і водночас слабке вологопоглинання.

- ✚ Екструдер – гнучкий, пружний також має властивість водонепроникності та простий у застосуванні. Його важлива здатність – це збереження теплоізоляції при екстремальних умовах, а саме під час низьких температурних даних[22-24].



Рисунок 1.5 – Зразок екструдованого пінополістиролу [24]

Для забезпечення найменших втрат тепла протягом тривалого часу рекомендується застосування теплоізоляційного матеріалу з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Враховується й вартість матеріалу, й можливість використання його на довготривалий час використання.

Товщина теплоізоляційного шару розраховується в залежності від призначення теплової ізоляції обладнання. На її величину впливають такі фактори, як температура стінки теплообмінника та температура зовнішньої обкладинки теплової ізоляції, властивості ізоляційного матеріалу. Доцільно для захисту гарячих теплообмінників використовувати товщину шару в 2-9 см. Температура зовнішньої обкладинки теплової ізоляції для теплообмінників, що установлюють в середині промислових середовищ, де відбуваються ці процеси, повинна бути меншою, або дорівнювати  $45^{\circ}\text{C}$ , а температура стінки апаратів, що установлюють на відкритих площадках, повинна бути меншою не більше чим на  $15-25^{\circ}\text{C}$  від температури навколишнього середовища. Доцільно робити теплоізоляцію теплообмінників із декількох шарів: перший – сама ізоляція, другий – захисний кожух, який захищає внутрішній шар ізоляції від впливу атмосферних явищ у вигляді вітру, вологи, а також фізичних ушкоджень. Його закріплюють самонарізними гвинтами на зовнішній поверхні обкладинки

теплової ізоляції. Захисний кожух виготовляють з листів алюмінію, алюмінієвих сплавів або оцинкованої сталі [22-24].

## Висновки до I-го розділу

Процес теплообміну – це фізичний процес передавання енергії у вигляді деякої кількості теплоти від тіла з більшою температурою (гарячий теплоносій) до тіла з меншою температурою (холодний теплоносій). Теплоносій – це тіло або середовище, яке безпосередньо залучене до процесу теплообміну.

З даного розділу робимо висновок, що коефіцієнт теплопровідності найбільший у твердих тілах, так як вимагає мінімальних відстаней між молекулами у будові своєї структури, тобто є найбільш щільними. Структурна будова рідин менш щільна, молекули знаходяться на середній відстані, це не дає змогу їм розщеплюватись між собою. Тому коефіцієнт теплопровідності залежить від температури і властивості речовини і є більшим ніж у газів, але меншим ніж у металах та тілі людини. Теплопровідність рідин зменшується при збільшенні температури, це стосується всіх рідин, крім води та її розчинів і гліцерину. Гази, крім гелію і водню, пари рідин мають найбільшу відстань між молекулами у своїй структурі, тому їх коефіцієнт є найменшим, але його можна збільшити за допомогою зростання температури, чим більша температура, тим більша теплопровідність. А тиск у газах на коефіцієнт теплопровідності майже не впливає, тому розміром до  $5 \cdot 10^6$  Па не враховують.

Коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ) із формули (1.4) має вигляд:

$$\lambda = \frac{Qd}{F(t_{cr1} - t_{cr2})} \quad (1.8)$$

Для розрахунку теплопередачі у теплообміннику через одношарову плоску пластину потрібно використовувати формулу:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F(t_1 - t_2) = KF(t_1 - t_2). \quad (1.6)$$

А для багат шарової:

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} \cdot F(t_1 - t_2) \quad (1.7)$$

Важливим фактором є теплоізоляція, вона дає змогу зменшити тепловитрати під час роботи теплообмінника. В експериментальній установці будемо використовувати екструдований пінополістирол, який дасть змогу зменшити тепловитрати і дуже простий у використанні.

## РОЗДІЛ II. СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

### 2.1 Призначення і класифікація теплообмінних апаратів

Теплообмінним апаратом є прилад, основна функція якого – передача теплоти від одного робочого середовища, що називається гарячим теплоносієм до іншого, що називається холодним теплоносієм, для здійснення різних теплових процесів: нагрівання, охолодження, конденсації, підвищення концентрації розчинів. Теплообмінники можна класифікувати за різними критеріями, один з таких – спосіб передачі тепла, він поділяє на поверхневі теплообмінники і контактні.

Особливостями контактних теплообмінників є контакт при передачі тепла від першого та другого теплоносіїв, а саме між гарячим і холодним. Цей контакт відбувається при різних фазових станах. Також може відбуватися зміна агрегатного стану. Фазові стани, які існують при теплообміні [25-28]:

- між газ – газ;
- між рідин. – рідин.;
- між пар – рідин.;
- між пар – газ;
- між газ – метал.

Що стосується поверхневих, то між гарячим та холодним теплоносіями знаходиться пластина (поверхня теплообмінну), через яку буде йти обмін тепла між теплоносіями. Поверхневі також, як і всі теплообмінники, діляться на два типи [25-28]:

- рекуперативні;
- регенеративні.

Принцип дії рекуперативних теплообмінників полягає в одночасній роботі теплоносіїв, які розповсюджуються по різних боках поверхні теплопередач, при цьому обмін теплом проходить через спільну пластину.

Регенеративні навіпаки працюють циклічно, по черзі проходять по поверхні теплообмінника. Спочатку гарячий теплоносій працює і контактує теплообмінною поверхню, нагріваючи її до вказаної температури, або впродовж визначеного часу. За допомогою реле або автоматичного перемикаччя відбувається зміна роботи теплоносіїв. Починає працювати холодний теплоносій, який охолоджує поверхню, яка нагрілася і в той же час сам нагрівається. Через деякий час знову спрацьовує реле і включається гарячий теплоносій і так працює циклічно. Зазвичай у регенеративних теплообмінниках використовується газовий теплоносій.

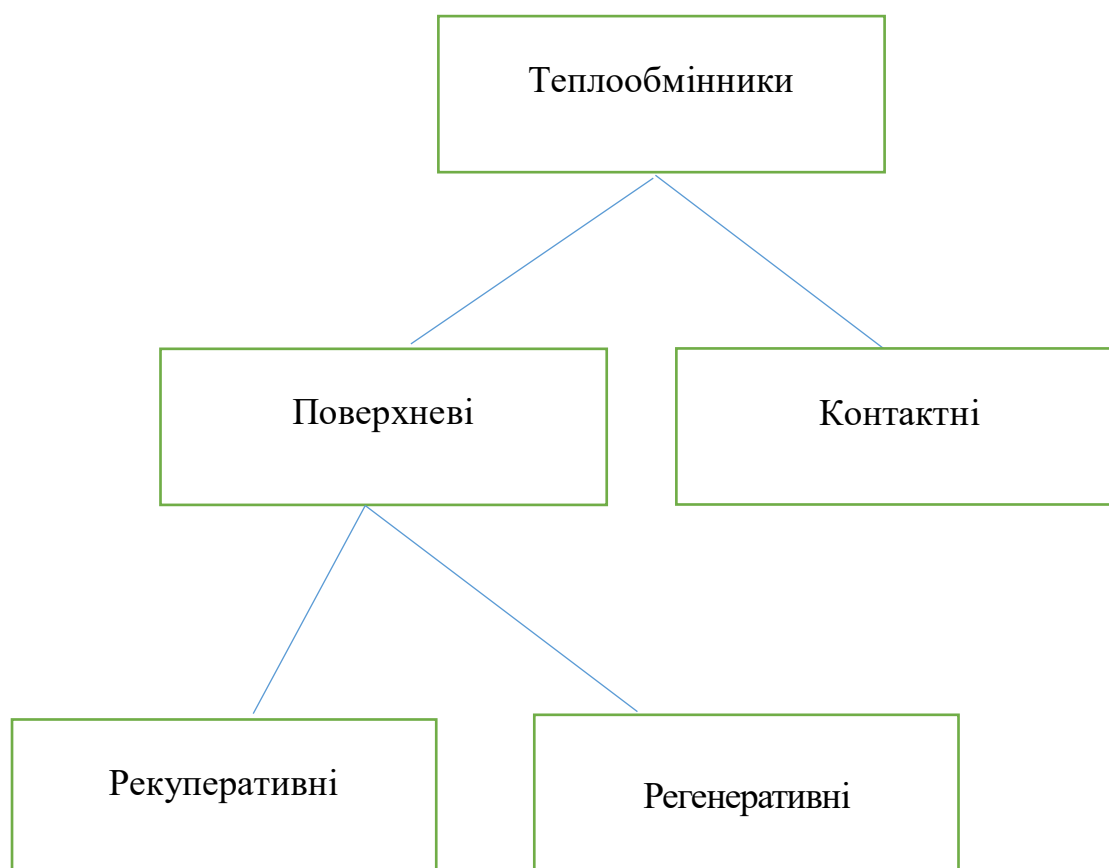


Рисунок 2.1 – Схема класифікації теплообмінників за функціональними ознаками

Перший критерій (основні завдання), за яким розрізняють рекуперативне теплообмінне обладнання. Воно поділяється на (рис. 2.2):



Рисунок 2.2 – Схема класифікації рекуперативного обладнання теплообмінників

Для кожного із цих видів є свої основні процеси, в деяких випадках обидва процеси. Для підігрівників важливим є процес обігріву холодного теплоносія до заданої температури. Для холодильниці – охолодження тіла за допомогою холодного теплоносія, а у випарниках – випаровування – перехід із одного стану в інший за допомогою роботи гарячого теплоносія, який нагріває інше тіло до температури кипіння і випаровується. Лиш в теплообмінниках обидва процеси мають однакову роль [26, 29-30].

Другий критерій, за якими розрізняють, це вид поверхні теплообмінника, а саме листові та трубчасті. До листових відносяться [29-30]:

- ✚ пластинчасті;
- ✚ ребристі;
- ✚ спіральні.

До тих, які робляться із труб:

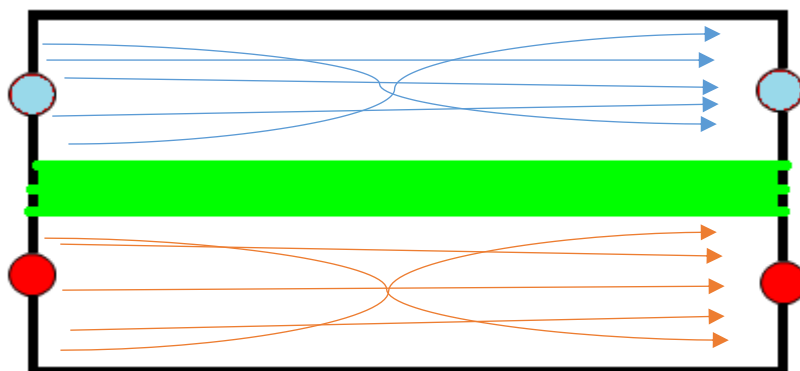
- ✚ трубні;
- ✚ труба в трубі;
- ✚ кожухотрубчасті.

Третій критерій – розміщення в теплообміннику поверхні теплообмінної. Поділяються на[29-30]:

- ✚ похилі;
- ✚ по горизонталі;
- ✚ по вертикалі.

Також важливим вважається напрям потоків теплоносіїв, особливо це стосуються газів і рідин. Існує 3 напрямки пересування (рис. 2.3):

- прямоточний – рух теплоносіїв є паралельний між собою і напрям їх потоків співпадає.
- протиток – рух теплоносіїв є паралельним між собою і напрям їх потоків йде в різні сторони;
- перехресний потік – це перпендикулярний напрямок потоків теплоносіїв між собою.



а)

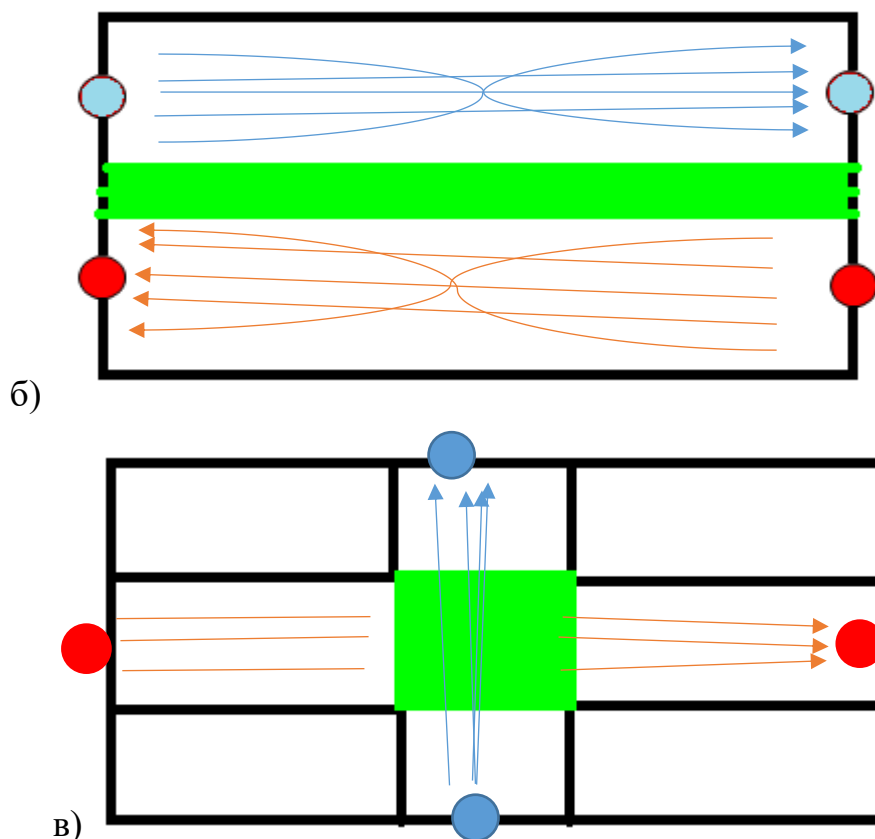


Рисунок 2.3 – а) прямоточні, б) протитік, в) перехресний потік.

де  – рух потоку холодного теплоносія;

 – рух потоку гарячого теплоносія.

## 2.2 Теплообмінники із листів

Розрізняють три види апаратів, які належать до теплообмінників із листів, а саме:

- спіральні апарати;
- пластинчасті апарати;
- ребристі апарати.

Пластинчасті теплообмінники мають застосування у різних виглядах від суцільно нерозбірних, до розбірних теплообмінних апаратів.

Нерозбірні теплообмінні апарати часто використовуються більше в домашніх цілях. Основною умовою цього теплообмінника є робота в тих середовищах, де під час теплообміну між теплоносіями не залишається на пластинках в отворах не

розчинених залишків, яким не допоможе навіть хімічна обробка. Їх виготовляють із тонких плоских пластинок, з'єднаних так, щоб утворювалися індивідуальні канали, щоб у них вільно рухалися теплоносії. Пластини складають між собою і паяються або зварюються. Їх називають секції. Із секцій складають пакети, а вже з пакетів створюють основні блоки, по яких роблять розрахунок площі поверхні. Утворений блок з визначеною площею поверхні теплообміну та матеріалу за допомогою гвинтової шпильки стискають додаткові на початку і кінці пластини. В цьому випадку теплообмінник вже не можна розібрати, залишається лише тільки промивати або продувати для очистки [31-33].

Розглянемо один з випадків теплообмінного обладнання із пластинами типу 1.0. Це теплообмінник, який містить пластини розміром один метр в ширину та один метр у довжину та які мають 1,2 міліметри товщиною, виготовлені із металу. За допомогою них обігрівають і охолоджують моноетаноламіну. Такі теплообмінні апарати використовуються для установок з видаленням газової суміші при виробленні аміаку. Конструкція цього типу складається з пластин, спаяних по краях, в яких знаходиться гумові щільні вкладки. Разом вони створюють пакет, а з пакетів – блоки. Існують два ізольовані проходи, через які поступають потоки гарячого та холодного теплоносіїв. До них приєднуються трубки з матеріалу, який має найменші втрати температури, для введення і виведення повітря.

Також часто використовують теплообмінне обладнання із подвійними пластинами. Його основне призначення – обігрівати тіла або робочі середовища та охолоджувати конденсації пар. Різниця між теплообмінниками із пластинами 1.0 та здвоєними полягає в тому, що з однієї сторони замість гумових вставок йдуть здвоєні та зварені, що дає змогу розширювати сферу застосування пластинчастого виду теплообмінника. Там, де знаходиться гумова вставка, йде напрямлений потік не агресивного холодного середовища. Це дає змогу простіше проводити механічну очистку отворів, а зі сторони звареної сторони в отворах надходить агресивний потік гарячого середовища, він очищується тільки за

допомогою хімічної обробки. Завдяки цій конструкції вони спокійно можуть замінити роботу кожухотрубчастих теплообмінників. Гумові вкладки кріпляться за допомогою затиску, кільцеві колекторні – спеціальним клеєм[31-34].

Розбірні теплообмінники (рис. 2.4) складаються з плоских однакових гофрованих пластин завтовшки від 0,15 до 1 міліметра, щільно упакованих в батарею. Між листами знаходяться вкладки з м'якої, силіконової гуми. Отвори у формі кола для проходження знаходяться на пластині у верхніх та нижніх кутах теплообмінника. Більшість потоків зроблено так, щоб рухалися протитечії між двома або більше пар пластин. Розмір відстані між пластинами від трьох до шести міліметрів. При цих відстанях забезпечуються більші коефіцієнти тепловіддачі. Кількість пластин в теплообмінних апаратах коливається від двох до трьохсот штук. Площа поверхні не розбірних теплообмінних апаратів на практиці більша ніж розбірних. А перевага розбірних теплообмінників в тому, що їх можна використовувати в брудних середовищах, бо їх зручно розбирати і очищати, також можна замінювати пластини та каркас. Часто пластини виготовляють із міді, сталі [33,35-36].

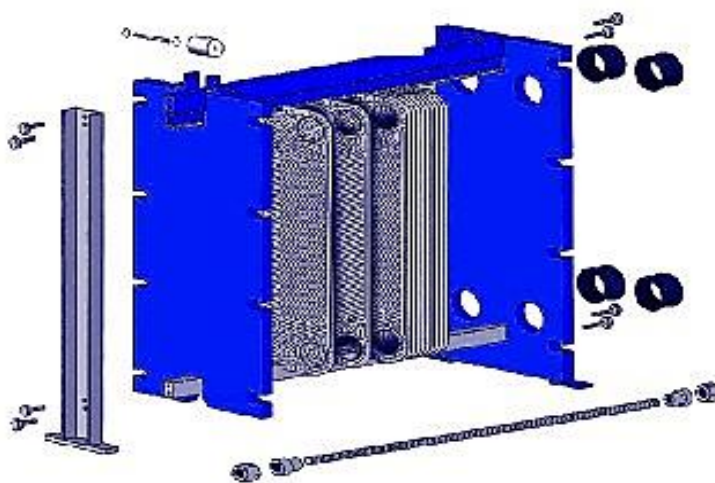


Рисунок 2.4 – Конструкція розібраного пластинчастого теплообмінника в розібраному вигляді [35]

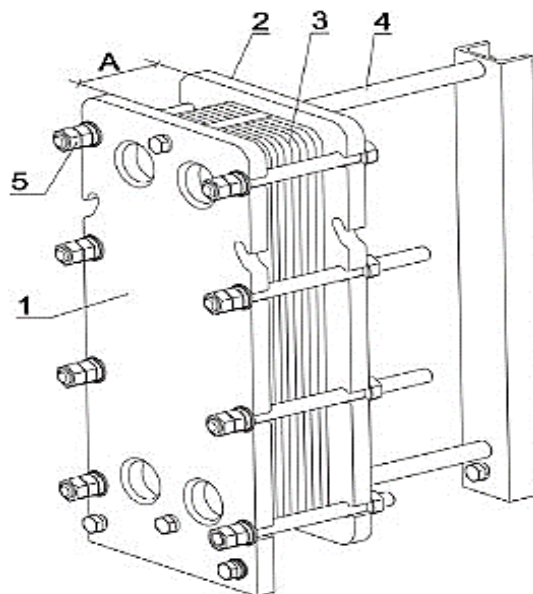


Рисунок 2.5 – Конструкція розібраного пластинчастого теплообмінника [36]

де А – ущільнена пластинка;

1 – пластинка для затискання;

2 – основна пластинка;

3 – пластинки;

4 – верхня рейка;

5 – гайки для фіксування.

Спиральний теплообмінник будується із листового металічного прокату. Конструкція такого теплообмінника складається з пластинки, до якої по краях приварені листи завтовшки від 0,7 до 1,2 міліметра та шириною від 0,5 до 1,5 міліметра, вони утворюють прохід шириною від 8 до 12 міліметрів, за допомогою спеціального пристрою намотують спіралі. Крок закручування спіралі залежить від товщини листка взятого матеріалу. Після закручування утворюється два шляхи для проходу теплоносіїв, а для зберігання їх ширини роблять мітки для контролю. Торці проходів за допомогою пароніту та гуми герметизують всі щілини. Такі теплообмінні апарати найчастіше всього використовують у середовищах одно і двофазних. У цих теплообмінниках є переваги та недоліки. Перевага в малій кількості металу на конструкцію, вони не мають різниці при розміщенні (вертикально чи горизонтально) та отримують високий коефіцієнт. Із недоліків –

складність побудови та обмеження тиском. При розгерметизації теплообмінника ремонту він вже не підлягає [35-36].

### 2.3 Види розрахунків теплообмінного обладнання

При побудові моделі проводять розрахунки теплообмінного обладнання. Таких основних розрахунків існує два види [37-39]:

- тепловий розрахунок (перевірочний);
- конструктивний розрахунок.

Для початку прийнято робити тепловий розрахунок (перевірочний), метою якого є перевірка характеристики побудованого теплообмінника із нормативними значеннями. При розрахунку визначають потужність теплообмінного обладнання та температуру потоку повітря при виході із нього. Щоб такі дані визначати потрібно мати початкові дані:

- + температура потоку на вході в теплообмінник;
- + вид теплообмінного обладнання;
- + розміри поверхні теплообміну або її площу;
- + схема напрямків теплоносіїв;
- + фізичні властивості;
- + витрати теплоносіїв.

При побудові є важливим конструктивний розрахунок теплообмінного обладнання. Основна мета цього розрахунку знаходження необхідних розмірів поверхні теплообміну для заданих параметрів теплоносіїв. Щоб знайти цю площу необхідні такі початкові дані [39]:

- потужність теплового обладнання;
- витрати теплоносіїв;
- температура на вході і хоча б одну при виході з теплообмінного обладнання;
- фізичні властивості.

При таких даних конструкційне розрахування дає змогу знайти площу поверхні теплообміну та невідому температуру при виході або потужність теплообмінного обладнання. Під час конструкційного розрахунку також проводять [37, 39-40]:

- ✚ механічні розрахунки – проводяться для визначення якості та жорсткості деталей теплообмінника. Проходить перевірка на міцність та навантаження при різних режимах, а саме тиск, вібрація.
- ✚ гідравлічний розрахунок – дає змогу визначити підходяще обладнання для перекачування рідини чи газу при визначенні гідравлічного опору теплообмінника.
- ✚ технічно-економічний розрахунок – рахується кількість витрачених коштів на побудову та подальшу модернізацію покращення характеристик теплообмінного обладнання
- ✚ компонентний розрахунок – знаходження співвідношень між площею поверхні теплообмінника і геометричними даними теплообмінного приладу.

### 2.3.1 Алгоритм теплового розрахунку

Такий розрахунок роблять для вибраного теплообмінника, умовою якого є надані значення площі поверхні теплообміну ( $F_{\text{дійсний}}$ ). Відомі також витрати обох теплоносіїв ( $G_1, G_2$ ). А знайти потрібно потужність приладу ( $Q$ ) і температуру теплоносіїв при виході з теплообмінника ( $T_1'', T_2''$ ). Розрахунок складається з таких етапів [41]:

1. Вказують невідомі за завданням температури при виході з теплообмінника ( $T_1'', T_2''$ ), із інтервалу ( $T_2' - T_1'$ ).
2. Потужність приладу ( $Q$ ) та температури не заданих теплоносіїв при виході з теплообмінного обладнання.

3. Будується графіки температурних змін теплоносіїв вздовж поверхні обігрівання  $T = f(F)$  і розраховують середню різницю температур теплоносіїв  $\Delta T$ .
4. Обчислюють і знаходять коефіцієнти теплопередачі ( $k$ ) та тепловіддачі  $\alpha_1, \alpha_2$ .
5. Обчислюють площу поверхні теплообміну ( $F_{\text{розрахункове}}$ ) з відомого нам рівняння теплопередачі.
6. Порівнюють  $F_{\text{дійсний}}$  та  $F_{\text{розрахункове}}$ .

Якщо  $\Delta = \frac{|F_{\text{розрахункове}} - F_{\text{дійсний}}|}{F_{\text{дійсний}}} < 5\%$ , то розрахунок закінчено, але

якщо  $\Delta = \frac{|F_{\text{розрахункове}} - F_{\text{дійсний}}|}{F_{\text{дійсний}}} > 5\%$ , то розрахунок повторюють з початку задаючи

інше значення температур на виході одного з теплоносіїв. Такі розрахунки проводяться доти, доки не буде досягнута умова. Таких спроб може бути дуже багато. Кількість ітерацій при розрахунку температур теплоносіїв можна зменшити за допомогою введення означення ефективності теплообмінного обладнання. Без врахування втрат теплоти в теплообмінному обладнанні його ефективність буде дорівнювати:

$$E = \frac{Q_1}{Q_{\max}} = \frac{Q_2}{Q_{\max}} \quad (3.1)$$

Де  $Q_1 = G_1 \cdot c_{p,1}(T_1' - T_1'')$  – кількість теплоти, яка надходить від гарячого теплоносія, а  $Q_2 = G_2 \cdot c_{p,2}(T_2'' - T_2')$  – кількість теплоти, яка надходить від холодного теплоносія.  $Q_{\max} = W_{\min} \cdot \Delta T$  – найбільша кількість теплоти, яку можна передати при протиточному напрямі теплоносіїв в теплообміннику із безкінечно великою поверхнею теплообміну.  $W_{\min}$  – мінімальна витратна теплоємність теплообмінного обладнання. Із врахуванням вираженого для всіх  $Q$  та формула (3.1) має вигляд для гарячого теплоносія [41]:

$$E = \frac{G_1 \cdot c_{p,1}(T_1' - T_1'')}{W_{\min} \cdot \Delta T} \quad (3.2)$$

та холодного теплоносія:

$$E = \frac{G_2 \cdot c_{p,2} (T_2'' - T_2')}{W_{min} \cdot \Delta T} \quad (3.3)$$

### 2.3.2 Конструктивний розрахунок

Цей розрахунок дає можливість обчислювати поверхню теплообміну, для цього потрібно охолодити гарячий теплоносій або навпаки обігріти холодний теплоносій до вказаної температури. Такий розрахунок має таку послідовність дій [41]:

1. Знаходять потужність приладу і при виході температуру теплоносія. Обов'язково потрібно враховувати, що питома теплоємність  $c_p$  є невідомою функцією від температури і рахується за допомогою методу послідовних наближень.
2. Будують графіки температурних змін теплоносіїв вздовж поверхні обігрівання  $T = f(F)$  і розраховують середню різницю температур теплоносіїв  $\Delta T$ .
3. Обчислюють і знаходять коефіцієнти теплопередачі ( $k$ ) та тепловіддачі  $\alpha_1, \alpha_2$ .
4. Обчислюють площу поверхні теплообміну ( $F$ ) з відомого нам рівняння теплопередачі, а саме з формули  $F = \frac{Q}{k \cdot \Delta T}$ .
5. Обчислюють і записують конструктивний розрахунок параметрів теплообмінного обладнання.

За даними алгоритмами розрахунків було розроблене програмне забезпечення, яке допомогло визначити ефективність теплообмінника та температуру гарячого і холодного теплоносія на виході теплообмінника при заданих вхідних температурах та витратах теплоносіїв.

## 2.4 Результати перевірного теплового розрахунку теплообмінника

Для теоретичного розрахунку режимів роботи пластинчатого теплообмінника на основі алгоритмів, викладених у роботі [41], нами була розроблена програма TCalc. Докладно особливості роботи програми розглянуто у главі 3.3, присвяченій програмному забезпеченню. У цьому розділі розглядаються результати, отримані за допомогою програми TCalc. Програма розраховує вихідні температури гарячого та холодного теплоносіїв, безрозмірний коефіцієнт теплопередачі NTU, ефективність теплообмінного апарату при заданих початкових значеннях температури та витрати теплоносіїв при відомих геометричних параметрах та теплофізичних параметрах теплообмінника. Також у вихідних файлах розраховується режим руху гарячого та холодного теплоносія – ламінарний, перехідний або турбулентний [41].

У наших розрахунках геометричні параметри теплообмінника у всіх випадках однакові, теплоносіїв – повітря, гарячий та холодний потоки рухаються під прямим кутом один до одного, хоч для спрощення розрахунку використовуються алгоритми для протитоку без поправного коефіцієнту. Всі теплофізичні характеристики теплоносія і матеріалу пластин взято з робіт [41-42]. У різних розглянутих нами випадках змінюються початкові температури теплоносіїв та їх витрати. Кожен канал теплообмінника має сторони 18 см, 12,5 см, висоту 0,3 см. Гарячий теплоносіїв рухається вздовж сторони 12,5 см, холодний – 18 см. Гарячий теплоносіїв має 14 каналів для теплообміну, холодний – також 14 каналів. Матеріал пластин теплообмінника – дюралюміній, товщина стінок – 0.04 см. Забрудненнями на пластинах та тепловими втратами через бокові стінки ми нехтуємо. Максимальне допустиме розходження наближених та обчислених значень, при якому ітераційний алгоритм закінчує роботу – 5%, як запропоновано у роботі [41].

При практичному використанні програми було встановлено, що подальше зменшення максимального розходження суттєво не впливає на точність розрахунку. Максимально допустима кількість ітерацій, при перевищенні якої

цикл обчислень вважається розбіжним і робота програми аварійно завершується – 100. На практиці задано точність розрахунку, яка досягається за декілька ітерацій, розбіжність циклу свідчить про некоректне завдання початкових умов.

Завдання 1. Початкова температура гарячого теплоносія –  $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , холодного –  $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Витрати гарячого теплоносія  $1,0\text{ л/с}$ , холодного –  $1,0\text{ л/с}$ . У циклі змінюється температура гарячого теплоносія з кроком  $1,0^{\circ}\text{C}$ , кількість кроків 150.

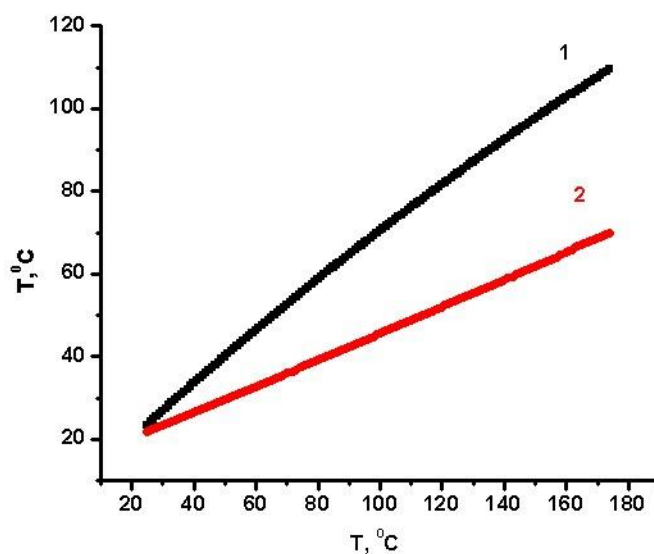


Рисунок 2.6 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія

де 1 – гарячий теплоносій;

2 – холодний.

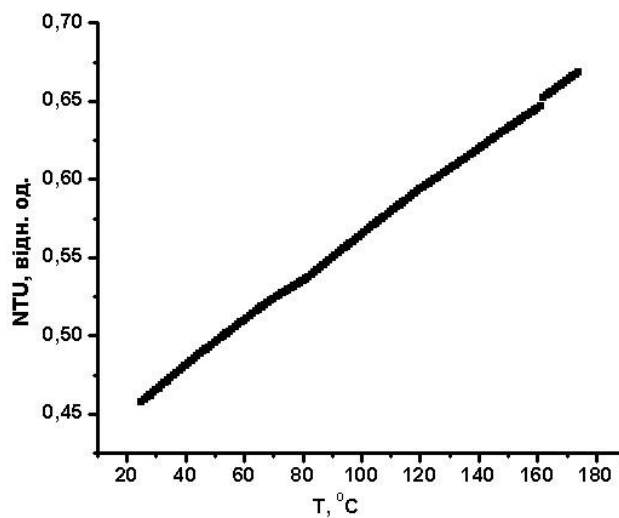


Рисунок 2.7 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія

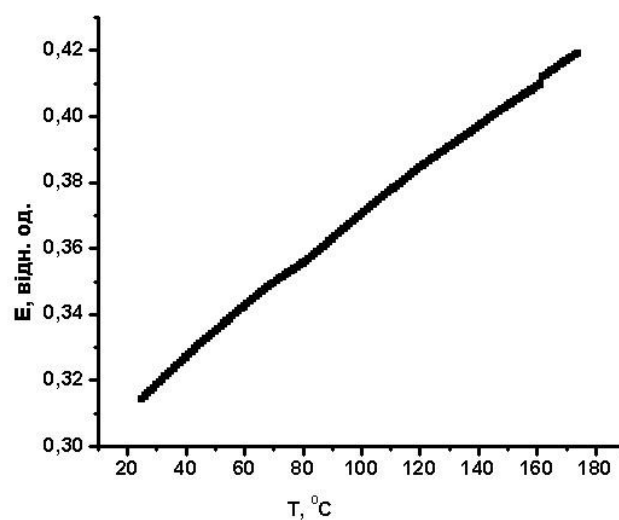


Рисунок 2.8 – Ефективність теплообмінника в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія.

Всі залежності на графіках близькі до лінійних. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний.

Завдання 2. Початкова температура гарячого теплоносія  $120,0^{\circ}\text{C}$ , холодного –  $5,0^{\circ}\text{C}$ . Витрати гарячого теплоносія  $1,0$  л/с, холодного –  $1,0$  л/с. У циклі

змінюється температура холодного теплоносія з кроком  $1,0^{\circ}\text{C}$ , кількість кроків 100.

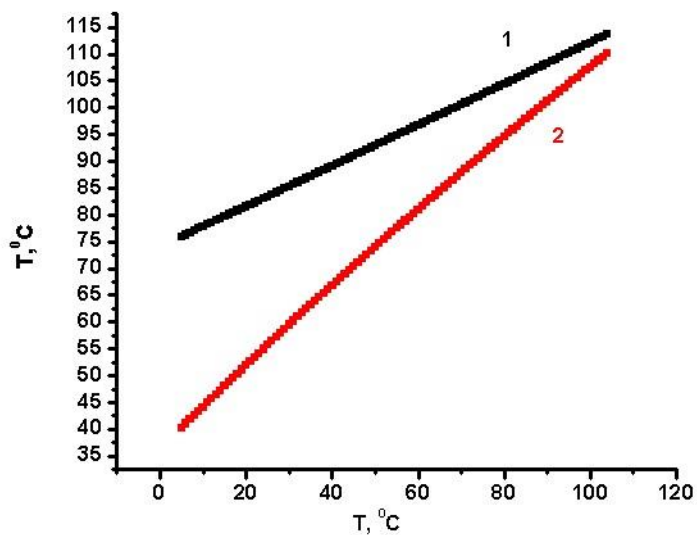


Рисунок 2.9 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від вхідної температури гарячого теплоносія

де 1 – гарячий теплоносій;

2 – холодний.

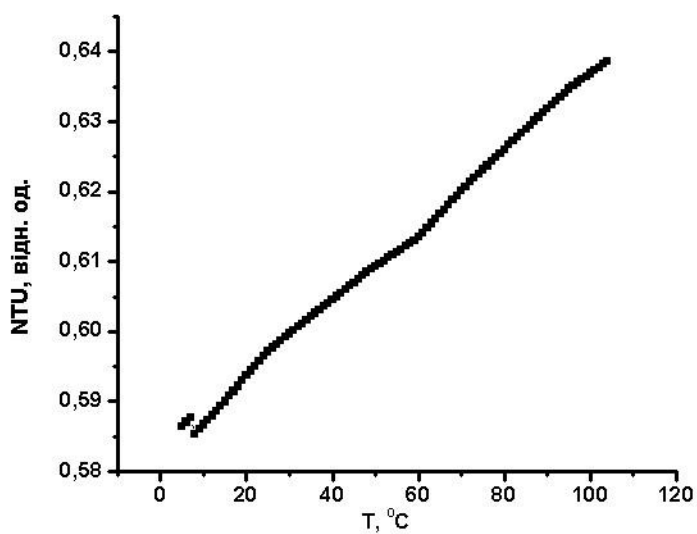


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від вхідної температури холодного теплоносія

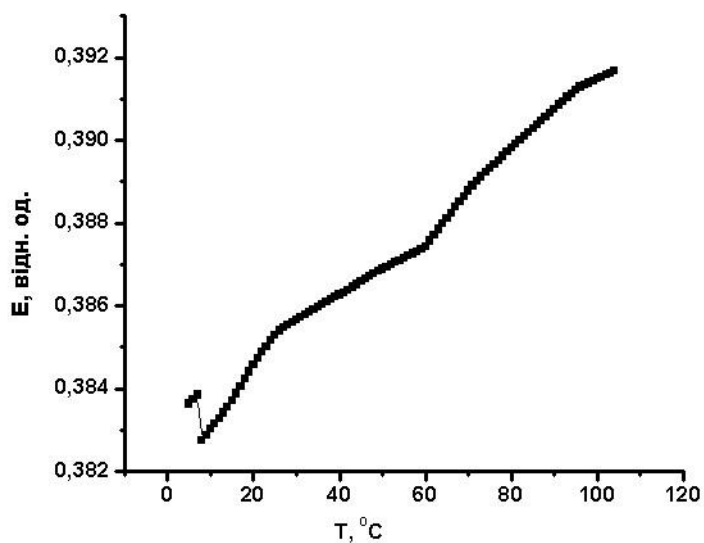


Рисунок 2. 11 – Ефективність теплообмінника в залежності від вхідної температури холодного теплоносія

Залежності на графіках вихідної температури близькі до лінійних, на графіках коефіцієнту теплопередачі та ефективності теплообмінника спостерігаються суттєві нелінійні ділянки. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний.

Завдання 3. Початкова температура гарячого теплоносія  $50,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , холодного –  $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Витрати гарячого теплоносія  $0,5\text{ л/с}$ , холодного –  $10,0\text{ л/с}$ . У циклі змінюються витрати гарячого теплоносія з кроком  $0,2\text{ л/с}$ , кількість кроків 100.

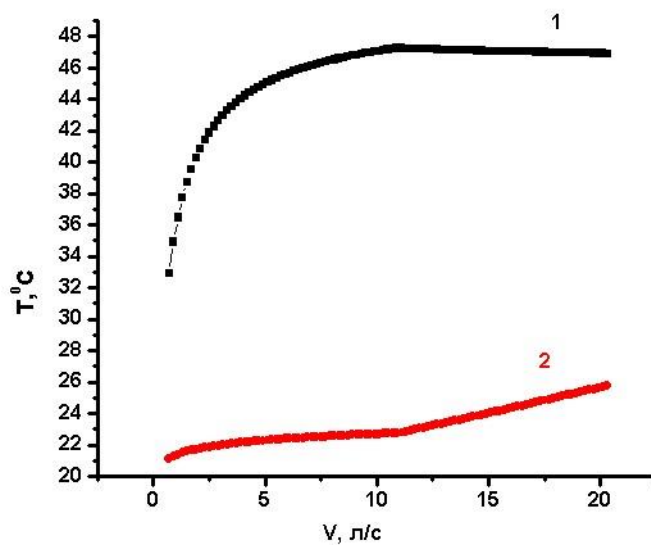


Рисунок 2.12 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати гарячого теплоносія

де 1 – гарячий теплоносій;

2 – холодний.

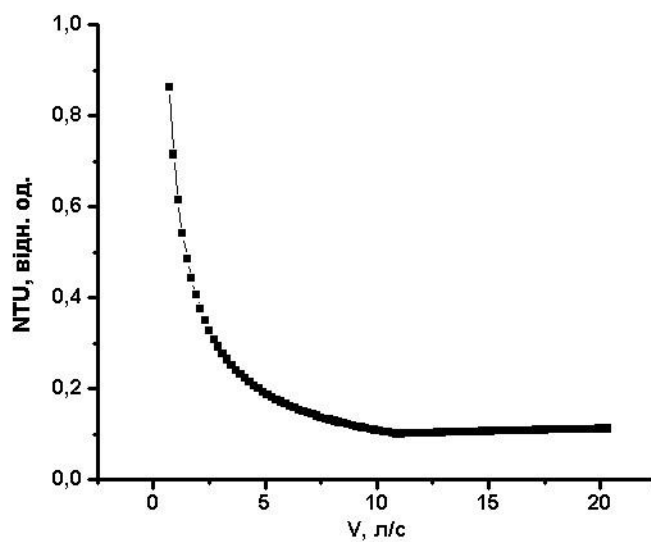


Рисунок 2.13 Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати гарячого теплоносія

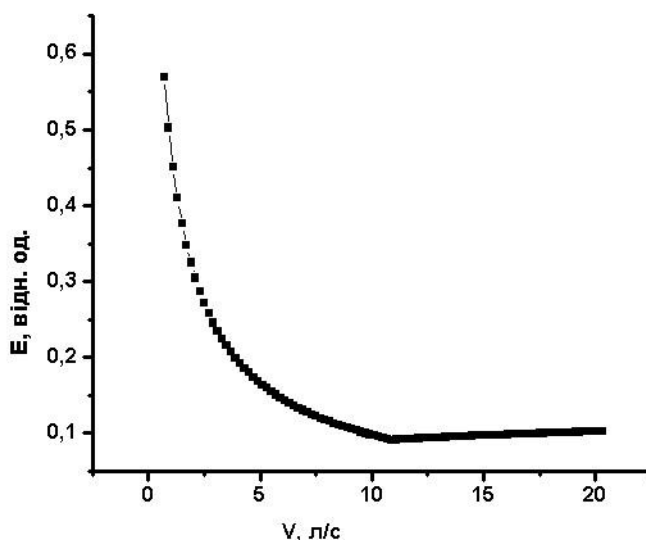


Рисунок 2.14 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати гарячого теплоносія

Вихідна температура гарячого теплоносія спочатку швидко нелінійно зростає, після значення розходу приблизно 10,5 л/с починає повільно спадати за законом, близьким до лінійного. Вихідна температура холодного теплоносія зростає за законом, близьким до лінійного. У точці приблизно 10,5 л/с спостерігається точка перегину, після якої швидкість зростання температури збільшується. Коефіцієнт теплопередачі та ефективності теплообмінника спадає при збільшенні витрат гарячого теплоносія за законом, близьким до гіперболічного. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний.

Завдання 4. Початкова температура гарячого теплоносія 50,0 °С, холодного – 20,0 °С. Витрати гарячого теплоносія 10,0 л/с, холодного – 0,5 л/с. У циклі змінюються витрати холодного теплоносія з кроком 0,2 л/с, кількість кроків 100.

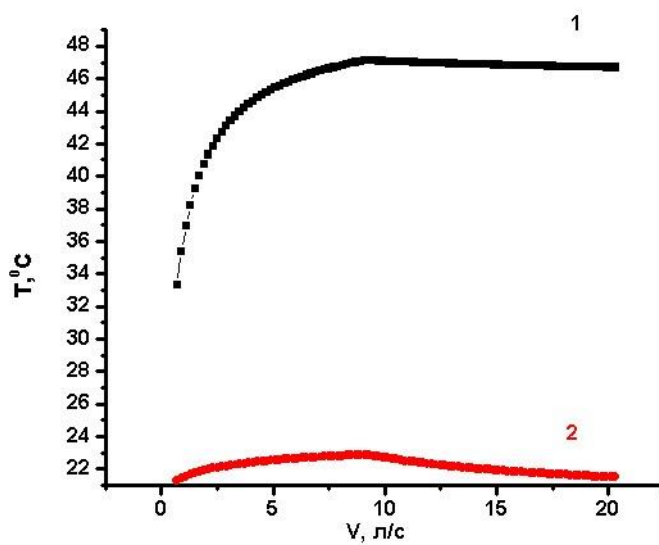


Рисунок 2.15 – Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати холодного теплоносія

де 1 – гарячий теплоносій;

2 – холодний.

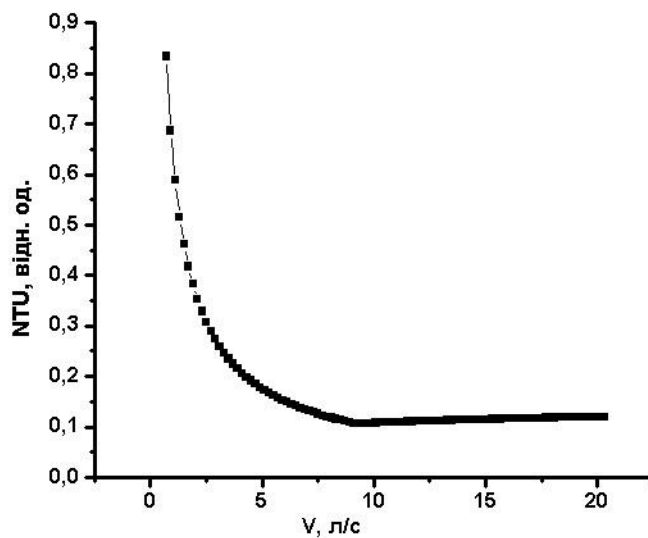


Рисунок 2.16 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати холодного теплоносія

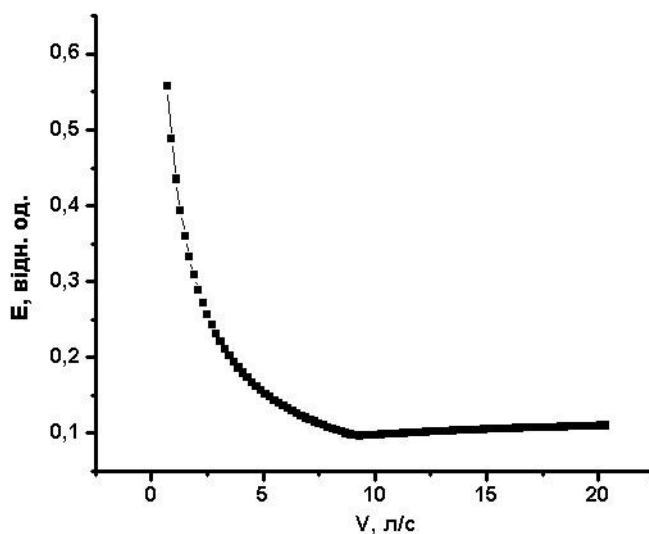


Рисунок 2.17 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати холодного теплоносія

Вихідна температура гарячого теплоносія спочатку швидко нелінійно зростає, після значення розходу приблизно 9,0 л/с починає повільно спадати за законом, близьким до лінійного. Вихідна температура холодного теплоносія спочатку лінійно зростає, після значень розходу 9,0 л/с – лінійно спадає. Коефіцієнти теплопередачі та ефективності теплообмінника спадають при збільшенні витрат холодного теплоносія за законом, близьким до гіперболічного. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний.

Завдання 5. Початкова температура гарячого теплоносія 50,0 °С, холодного – 20,0 °С. Витрати гарячого теплоносія 0,5 л/с, холодного – 0,5 л/с. У циклі змінюються витрати гарячого та холодного теплоносіїв одночасно з кроком 0,5 л/с, кількість кроків 1000.

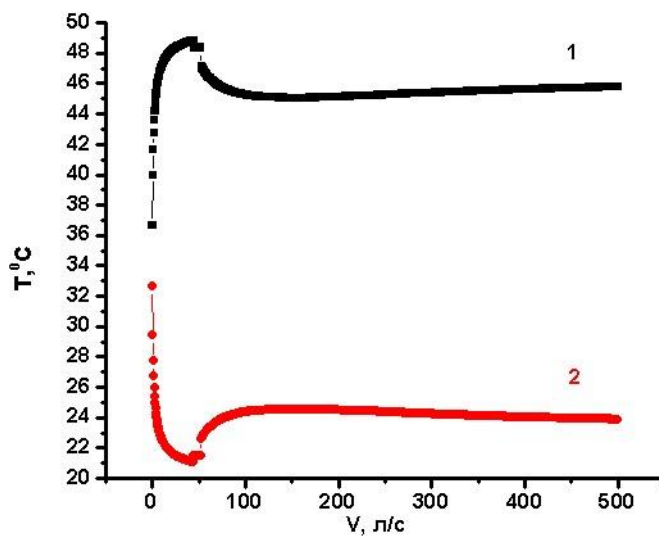


Рисунок 2.18 Вихідна температура теплоносіїв в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв

де 1 – гарячий теплоносій;

2 – холодний.

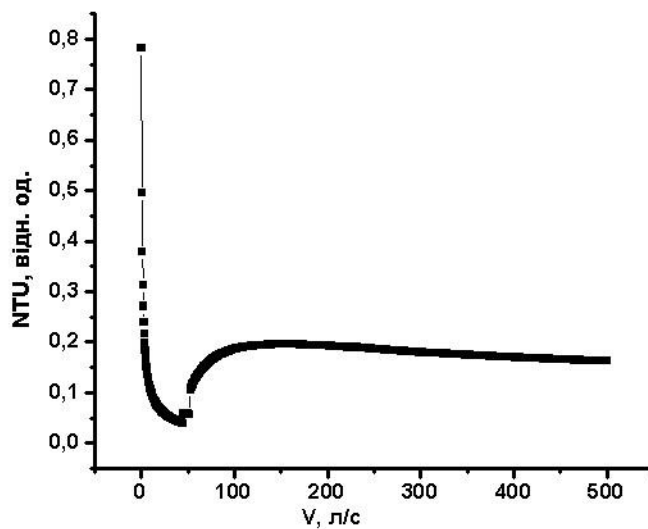


Рисунок 2.19 – Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв

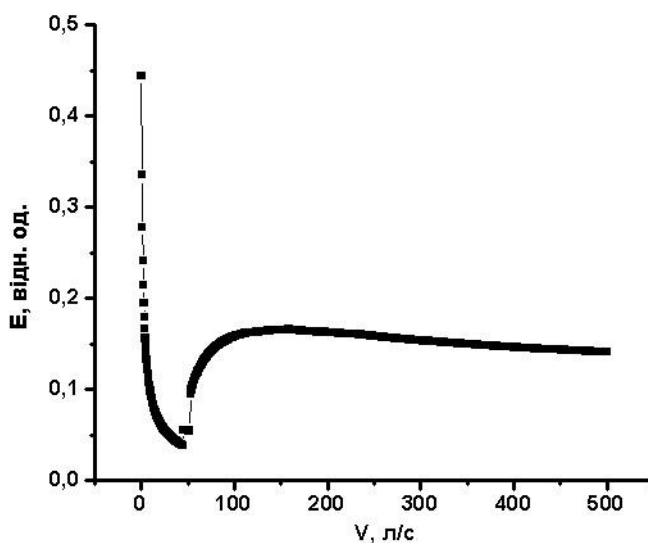


Рисунок 2.20 – Ефективність теплообмінника в залежності від витрати гарячого та холодного теплоносіїв

Вихідна температура гарячого теплоносія спочатку швидко нелінійно зростає, має максимум розходу приблизно 45,0 л/с, потім швидко спадає до мінімуму при 96,0 л/с, потім знову повільно зростає за законом, близьким до лінійного. Вихідна температура холодного теплоносія спочатку швидко нелінійно спадає до мінімуму при 45,0 л/с, потім швидко зростає до 96,0 л/с, потім повільно лінійно спадає. На ділянці від 45,0 л/с до 53,0 л/с на обох графіках спостерігається стрибок, пов'язаний зі зміною типу руху теплоносіїв з ламінарного до перехідного. Форма графіків коефіцієнту теплопередачі та ефективності теплообмінника подібна до форми графіка вихідної температури холодного теплоносія. Рух гарячого теплоносія залишається ламінарним до величини розходу 53 л/с, до розходу 227 л/с рух носить перехідний характер, вище – турбулентний. Для холодного теплоносія значення розходів в точках зміни типу руху 45 л/с та 227 л/с відповідно.

Отримані результати носять якісний характер, оскільки прийнята нами теплофізична модель має досить приблизний характер. Розраховані графіки дозволяють оцінити температури теплоносіїв на виході теплообмінника та

ефективність теплообмінника та обрати оптимальний режим роботи. При необхідності можна змінювати не тільки початкові температури теплоносіїв та їх витрати, а й геометричні розміри й матеріал пластин теплообмінника.

## Висновки до II-го розділу

В даному розділі було проаналізовано класифікацію та призначення теплообмінних апаратів. Визначено, що найпоширенішими серед споживачів та ефективними є пластинчасті теплообмінниками. Розглянуто особливості конструкції, які можуть виникати при побудові пластинчастих теплообмінників. Висвітлено недоліки та переваги розбірного та нерозбірного пластинчастого теплообмінника, наведено способи очистки.

Наведено основні види розрахунків та їх цілі. Описано поетапно алгоритми теплового та конструктивного розрахунку. На основі наведених алгоритмів було розроблено програмне забезпечення для визначення ефективності теплообмінника. Розрахунки були проведені для п'яти різних режимів. Отримані результати носять якісний характер, оскільки прийнята нами теплофізична модель має досить приблизний характер. Представлені на графіках залежності коефіцієнт теплопередачі та ефективність теплообмінника в залежності від температури і витрати гарячого та холодного теплоносія.

Розраховані графіки дозволяють оцінити температури теплоносіїв на виході теплообмінника та ефективність теплообмінника та обрати оптимальний режим роботи. При необхідності можна змінювати не тільки початкові температури теплоносіїв та їх витрати, а й геометричні розміри й матеріал пластин теплообмінника. На графіках дуже добре видно мінімуми та максимуми і це дає можливість у подальшому знайти оптимальний режим теплообмінника.

## РОЗДІЛ III. АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ

### 3.1 Комплектуючі елементи для побудови моделі

Для побудови експериментальної моделі та керування нею нами було використано багато елементів. В якості основного керуючого пристрою було вирішено взяти платформу Arduino.

Arduino – це відкрита платформа з даними кодами програм і бібліотек, що доступні всім бажаючим, вона дозволяє збирати всілякі електронні пристрої. В якості центрального контролера використовуються контролери типу AVR фірми Atmel. Це 8-бітні контролери, призначені для керування різноманітними автоматичними пристроями. Випускається велика кількість різних моделей AVR контролерів, які відрізняються своїми обчислювальними ресурсами, вбудованою апаратною периферією, розмірами, електричною потужністю, яку вони споживають, ціною. Існують два основні сімейства AVR контролерів Tiny та Mega, пристосовані для зовсім простих та більш складних задач автоматизації. Вони відрізняються об'ємом програмної та оперативної пам'яті, кількістю виводів, наявністю додаткових апаратних інтерфейсів. Архітектура контролерів дозволяє розробляти ефективні компілятори мов високого рівня й розробляти на них програмне забезпечення, що значно простіше, ніж використовувати асемблер. Проте розробка приладів на контролерах AVR залишається досить складною задачею. Для її спрощення у 2008 році фірмою Arduino LLC було розроблено платформу Arduino, яка дозволяє працювати з контролерами без використання програматора, використовуючи тільки кабель USB та спеціальний програмний завантажувач. Для цієї платформи написана величезна кількість різних прикладних програм і бібліотек, які дозволяють використовувати ресурси контролера, не заглиблюючись в особливості його роботи. Програмний код, написаний з використанням функцій з бібліотек Arduino, менш оптимальний, ніж при використанні “чистого” компілятора для AVR, але його розробка відбувається значно швидше і простіше. Мабуть, не залишилося датчиків, дисплеїв і

виконавчих механізмів, для яких не написана Arduino бібліотека або програма, в яких вони використовуються.

Для програмування використовується спрощена версія C ++, розробку можна вести як з використанням безкоштовного середовища Arduino IDE, так і за допомогою довільного C / C ++ інструментарію. Для програмування і зв'язку з комп'ютером вам знадобиться USB-кабель, а для автономної роботи буде потрібний блок живлення на 7,5-12 В. Плати Arduino будуть цікаві програмістам та всім зацікавленим зібрати свій прилад або керовану конструкцію [42-48].

Нами було використано плату Arduino Mega 2560 (рис.3.1) на базі контролера Atmega2560, яка має досить великі обчислювальні ресурси. Програмна пам'ять складає 256 Кб, оперативна – 8 Кб, енергонезалежна – 4Кб. Тактова частота 16 МГц. Загальна кількість виводів 54, з яких є 16 входів 10-бітного АЦП і 17 виходів широтно-імпульсного модулятора, який можна використовувати в якості ЦАП. Є апаратна підтримка інтерфейсів I2C та SPI. У даній реалізації плати в якості USB-UART перехідника використана мікросхема СН340, яка зарекомендувала себе стабільністю та високою швидкістю передачі даних при умові встановлених додаткових драйверів. Для Arduino Mega2560 можна знайти велику кількість прикладів бібліотек, програм та описи різних зібраних конструкцій[42-48].



Рисунок 3.1 – Вид зверху Контролера Arduino Mega 2560 [45]

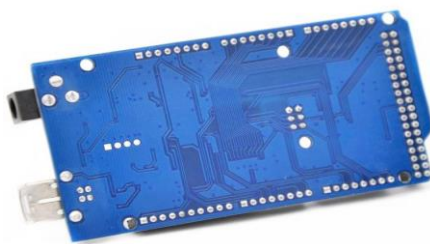


Рисунок 3.2 – Вид знизу Контролера Arduino Mega 2560 [45]

Датчик вологості та температури DHT11 (цифровий) (рис.3.3). Датчик DHT11 – це цифровий датчик температури та вологості, який дозволяє калібрувати цифровий сигнал при виході. Складається з ємнісного датчика вологості і термістора. Даний датчик містить в собі АЦП, що дозволяє перетворення аналогових значень вологості та температури[38-43].

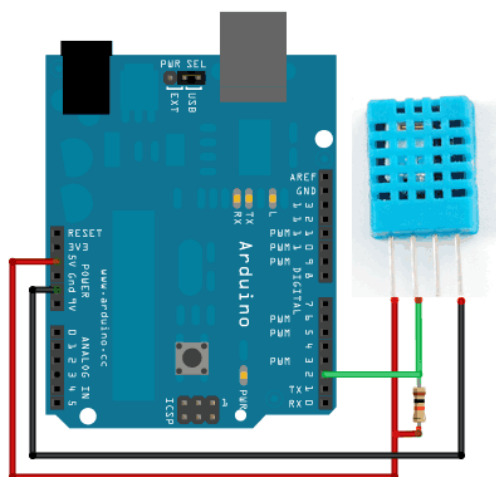


Рисунок 3.3 – Датчик DHT11 приєднаний до контролера Arduino UNO [45]

Датчик якості повітря MQ135 (виходи цифрові та аналогові) (рис.3.4). Модуль датчика якості повітря MQ135 призначений для визначення вмісту та кількості шкідливих і небезпечних газів в повітрі таких, як пари алкоголю, бензину, диму, CO<sub>2</sub> та інших. На самій платі модуля передбачений компаратор,



персонального комп'ютера. Перетворювач виконаний на мікросхемах СН340 і МАХ485. Підтримувана швидкість обміну даними від 50 до 2М Бод. Модуль RS485 виконаний в зручному пластиковому корпусі і не вимагає додаткового живлення. Використовувався нами для роботи з модулем Arduino та модулем АЦП ІСР-СОН І-7019[43-46].



Рисунок 3.6 – Перетворювач інтерфейсу RS-485 у USB [45]

Модуль перетворювача UART у RS-485 (рис.3.7). Модуль зібраний на основі мікросхеми МАХ485 і призначений для підключення мікроконтролерів з інтерфейсом UART до інтерфейсу RS-485, який широко використовується у промисловій автоматичній. Модуль має входи UART, входи RS-485 та входи керування напрямком передачі по інтерфейсу RS-485. Напруга живлення модуля 5 В. Ми використовували цей модуль для зв'язку контролера Arduino Mega 2560 з персональним комп'ютером. З боку контролера Arduino використовується послідовний порт UART1 (з чотирьох наявних, від UART0 до UART3) і додатковий цифровий вихід для керування напрямком передачі. З боку персонального комп'ютера – перетворювач інтерфейсу RS-485 у USB, описаний вище [43-46].



двигунами, світлодіодами та іншими. Кожен транзистор комутує струм до 500 мА при напрузі до 50 В. Ми використовували ULN2003AN для переключення реле [43-44,46].

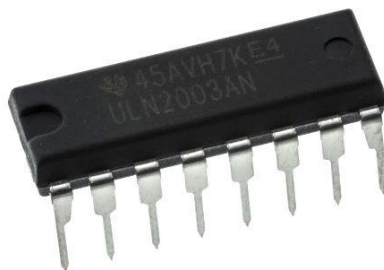


Рисунок 3.9 – Мікросхема ULN2003AN

Комп'ютерний кулер на 12В 0,16А (рис.3.10). Термін служби вентилятора становить близько 30000 годин, підходить для щоденного використання. Розмір: 60х60х15мм. Призначений для охолодження деталей персональних комп'ютерів. Два кулери використані нами для подачі повітря у теплообмінник[38-43].



Рисунок 3.10 – Комп'ютерний кулер

Блок живлення стабілізований (рис.3.11). Вхідна напруга 100-240В змінного струму 50 / 60Гц, вихідна 12В постійного струму, 1000мА. Використано нами для живлення всього стенду, окрім кулерів та нагрівача [43-46].



Рисунок 3.11 – Блок живлення стабілізований [45]

Джерело постійного струму Б5-47 (рис.3.12). Джерело живлення постійного струму Б5-47 призначене для живлення радіотехнічних пристроїв стабілізованою напругою і струмом в лабораторних і цехових умовах. Величина вихідної напруги і струму може регулюватися вручну і дистанційно. Передбачена можливість роботи джерела як з ізольованим виходом, так і при заземленні клеми будь-якої полярності. Вихідна напруга Б5-47 гарантується не тільки на клеммах, а й безпосередньо на навантаженні, що досягається за рахунок використання чотирьох клем у системі підключення навантаження до джерела. Нами використано два блоки для живлення кулерів та нагрівача і регулювання їх потужності [43-46].



Рисунок 3.12 – Джерело постійного струму Б5-47[ 45]

Нагрівач на резисторі ПЭВ-50 (рис.3.13). Резистори ПЕВР – постійні дротяні (П), емальовані (Е), вологостійкі (В), регульовані (Р), трубчасті резистори, номінальний опір від 1 Ом до 100 кОм, розсіює потужність в залежності від номіналу – від 3Вт до 160Вт. Експлуатуються в ланцюгах постійного або змінного струму, забезпечуючи обмеження сили струму і розподіл напруги. Ми використали резистор номіналом 16 Ом для нагрівання повітря у нашому дослідному стенді [43-46].



Рисунок 3.13– Резистори типу ПЭВ-50 [45]

### 3.2 Будова моделі та принцип роботи

Побудова експериментальної установки складається з двох частин. Перша частина – це моделювання системи опалення та вентиляції (рис.3.14), а друга – побудова рекуператора та вимірювання параметрів даного теплообмінника.

Моделювання системи опалення та вентиляції. За допомогою екструдованого пінополістиролу було зроблено герметичну коробку – модель приміщення (рис. 3.15), розміром 60×60×60 см. Дана модель всередині обігривається за допомогою нагрівача, в якості якого використовувався резистор ПЭВ-50 опором 16 Ом. Потужність нагрівача задавалася за допомогою джерела постійного струму Б5-47. Також всередині було розміщено датчик якості повітря MQ135, датчик вологості та температури DHT11 (цифровий) та два датчики температури (аналогові) LM35DZ, один з яких було встановлено в коробці на деякій віддалі від DHT11, другий – на зовнішній поверхні коробки. Це дає змогу отримувати детальну інформації по всьому середовищі. В бічній стороні моделі знаходяться два отвори, в яких встановлено труби. Перша труба поглинає повітря ззовні за допомогою кулера, який нагнітає повітря в коробку. Друга труба відповідає за вивід повітря з коробки за допомогою другого кулера.

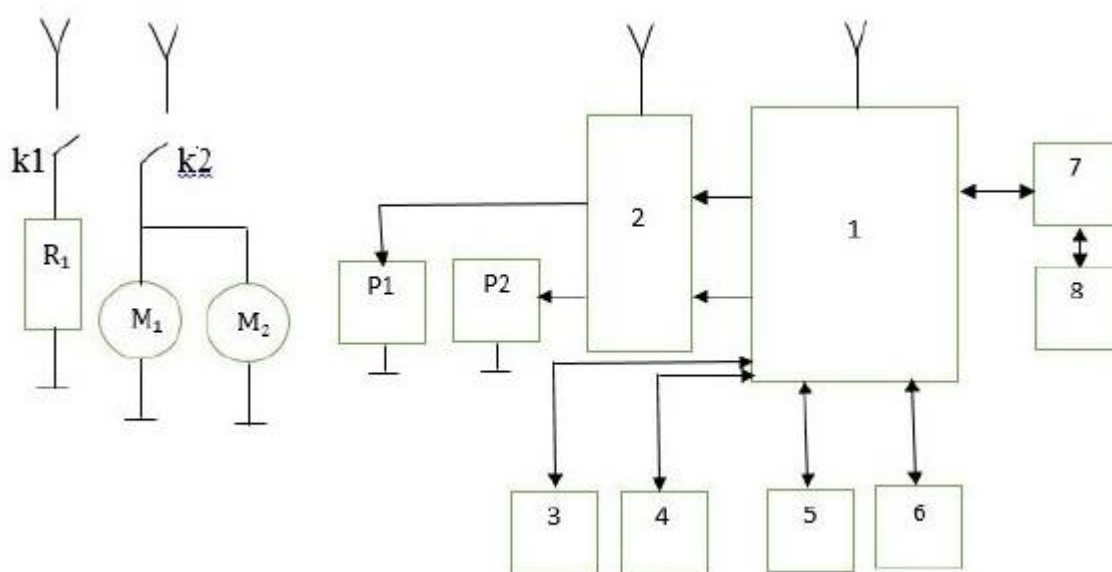


Рисунок 3.14 – Схема експериментального станда

де 1 - плата контролера Arduino Mega 2560; 2 - мікросхема ULN2003AN; 3,4 - термометри LM35DZ; 5 - датчик вологості і температури DHT11; 6 - датчик якості повітря MQ135; 7 - перетворювач UART у RS-485; 8 - перетворювач RS-485 у

USB; P1,P2 - електромагнітні реле для керування кулерами та нагрівачем; K1,K2 - контакти реле P1 та P2; M1,M2 - двигуни кулерів; R1 - резистор нагрівача.

Нагрівач та кулери живляться від регульованого джерела постійного струму Б5-47, що дозволяє змінювати режими їх роботи. В якості основного керуючого пристрою було вирішено взяти плату Arduino Mega 2560. За допомогою цього контролера ми збираємо інформацію з датчиків та управляємо вентиляторами. Вентилятори і резистор перемикаються за допомогою реле, якщо температура нижча чим заданий діапазон температур, то вмикається резистор, який обігріває, якщо ж більша – то починають працювати вентилятори, щоб охолодити середовище. Реле переключуються за допомогою транзисторних ключів мікросхеми ULN2003AN, до входів яких приєднано цифрові виходи контролера Arduino. У свою чергу контролером Arduino керує програма, запущена на персональному комп'ютері. Для зв'язку між комп'ютером та контролером використовується інтерфейс RS-485, який часто використовується в пристроях промислової автоматики і може працювати у складних умовах при високому рівні електромагнітних шумів. Для роботи інтерфейсу на комп'ютері було використано перетворювач RS-485 у USB, а з боку контролера Arduino –перетворювач UART у RS-485.



Рисунок 3.15 – Модель приміщення

Графік (рис. 3.16) залежності температури повітря в експериментальному стенді від часу при роботі релейного стабілізатора температури. Температура вмикання нагрівача  $T_1=33^\circ\text{C}$ , температура вмикання нагрівача й включення охолоджувача (вентилятора)  $T_2=35^\circ\text{C}$ . Температура навколишнього середовища  $T_0=29.8^\circ\text{C}$ .

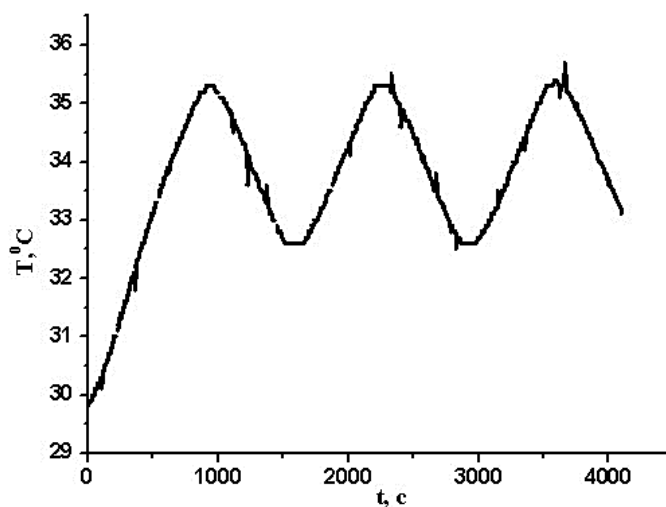


Рисунок 3.16 – залежності температури повітря в експериментальному стенді від часу при роботі релейного стабілізатора температури

На графіку 1 (рис. 3.17) – показано залежність температури повітря в експериментальному стенді від часу при постійно включеному нагрівачі, температура навколишнього середовища  $T_0=16.6^\circ\text{C}$ . Графік 2 (рис. 3.17) – залежність температури повітря в експериментальному стенді від часу при роботі релейного стабілізатора температури (один період). Температура вмикання нагрівача  $T_1=23^\circ\text{C}$ , температура вмикання нагрівача й включення охолоджувача (вентилятора)  $T_2=23.5^\circ\text{C}$  температура навколишнього середовища  $T_0=17.1^\circ\text{C}$ .

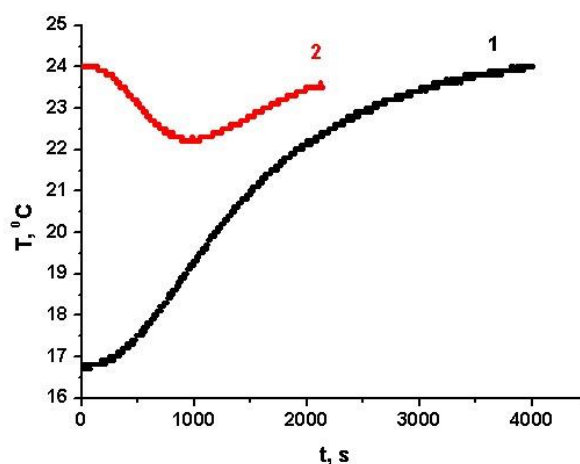


Рисунок 3.17 – Залежності температур від часу

Побудова пластинчастого рекуператора (рис. 3.18) з перехресним потоками та дослідження параметрів теплообміну у цьому рекуператорі. Для побудови було використано 28 пластинок розміром 175×132 мм з матеріалу дюралюміній та товщиною 0,4 мм. Пластинки накладалися одна на одну паралельно, між пластинками знаходились смужки ДВП з товщиною 3 мм та шириною 25мм. Смужки ДВП допомогли утворити перехресні отвори висота одного 3,2 мм та ширина 12,5 мм.



Рисунок 3.18 – Побудова пластинчастого рекуператора

Завдяки цим отворах між пластинами забезпечується потік повітря як в середину коробки, яка моделює приміщення, так і назовні. На кожному із входів та виходів встановлено трубу з діаметром 50 мм та вентиляторами. В кожную трубу поміщено по одному аналоговому датчику температури LM35DZ. За допомогою 8-канального 16-бітного модуля АЦП ICP-CON I-7019 проводились вимірювання вихідної напруги на датчиках (рис. 319). Модуль I-7019 має інтерфейс RS-485. Як і в попередньому випадку, ми використали перетворювач RS-485 у USB і приєднали модуль до комп'ютера. Далі, за допомогою розробленої нами програми, вимірювали і розраховували вхідні та вихідні температури гарячого та холодного повітря на входах і виходах рекуператора у різних режимах його роботи.

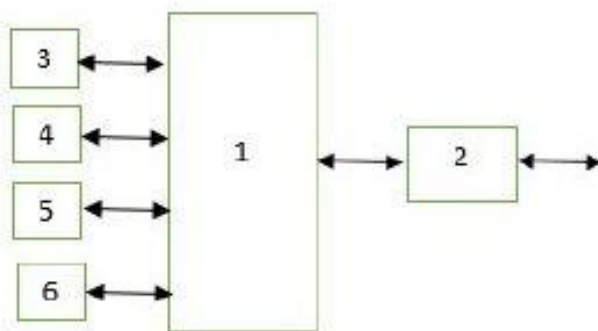


Рисунок 3.19 – Схема стенда для вимірювання температури

де 1 - модуль 16-бітного 8-канального АЦП ICP-CON I-7019; 2 - перетворювач RS-485 USB; 3,4,5,6 - термометри LM35DZ.

### 3.3 Програмне забезпечення для розрахунку та роботи з рекуператором

Для розрахунку режимів роботи і керування стендами для дослідження теплообміну нами було розроблено декілька програм. Більша частина з них призначена для роботи на персональному комп'ютері. Ці програми розроблені за

допомогою пакету програмування Borland C++ Builder 6.0 і працюють під керуванням операційної системи Windows. Програмне забезпечення не висуває особливих вимог до апаратних і програмних ресурсів комп'ютера і може бути запущено під будь-якою версією Windows починаючи з Windows-XP [50-52]. Крім цього, нами була розроблена програма для контролера Arduino Mega 2560 за допомогою пакету Arduino Arduino.cc.

Для теоретичного розрахунку процесу теплообміну у пластинчатому теплообміннику ми розробили програму TCalc. Програма розраховує температуру гарячого і холодного теплоносія на виході теплообмінника при заданих вхідних температурах та витратах теплоносіїв. Задаються геометричні розміри та теплофізичні параметри теплообмінника та теплоносіїв. Розрахунки ведуться в циклі, в залежності від режиму роботи змінюється певна вхідна величина. Режимів роботи 5, у режимі 1 змінюється температура гарячого теплоносія, 2 – холодного, 3 – витрати гарячого теплоносія, 4 – холодного, 5 – одночасно змінюються витрати гарячого та холодного теплоносіїв. В основу роботи програми були покладені алгоритми перевірного теплового розрахунку, наведені у роботі [41]. Алгоритм використовує метод послідовних наближень. Спочатку задаються початкові наближенні значення, по них виконуються розрахунки, отримані результати порівнюються з початковими припущеннями. Коли відносна різниця обчислених і заданих даних перевищує деяку межу (рекомендована величина похибки – не більше 5% [36]), розрахунок повторюється, в іншому випадку – закінчується. Багато параметрів, що описують фізичні властивості теплоносіїв та конструкційних матеріалів теплообмінника, у роботах [41,53] задано у вигляді таблиць.

Для роботи програми ці таблиці було перенесено в електронний вигляд, у текстові файли. Спеціальні функції у програмі виконують пошук табличних заданих значень і, при необхідності, розраховують проміжні значення методом лінійної апроксимації. У першому рядку кожної таблиці задаються масштабні множники, на які будуть помножуватися всі наступні значення цього стовпчика

таблиці. Це спрощує запис даних у таблиці. При розробці програми нами було використано деякі спрощення. У нашому реальному теплообміннику потоки теплоносія рухаються під прямим кутом один до одного, щілини теплообмінників мають різні геометричні розміри. При розрахунку ми використовували дійсні розміри, але використовували алгоритм для протиточного теплообмінника, без поправочних коефіцієнтів. Крім того, у роботі [41] кількість теплоносіїв задається у кг/с, ми використовуємо літри/с, що більш зручно при роботі з повітрям. При запуску програми на екрані з'являється вікно, показане на (рис. 3.20).

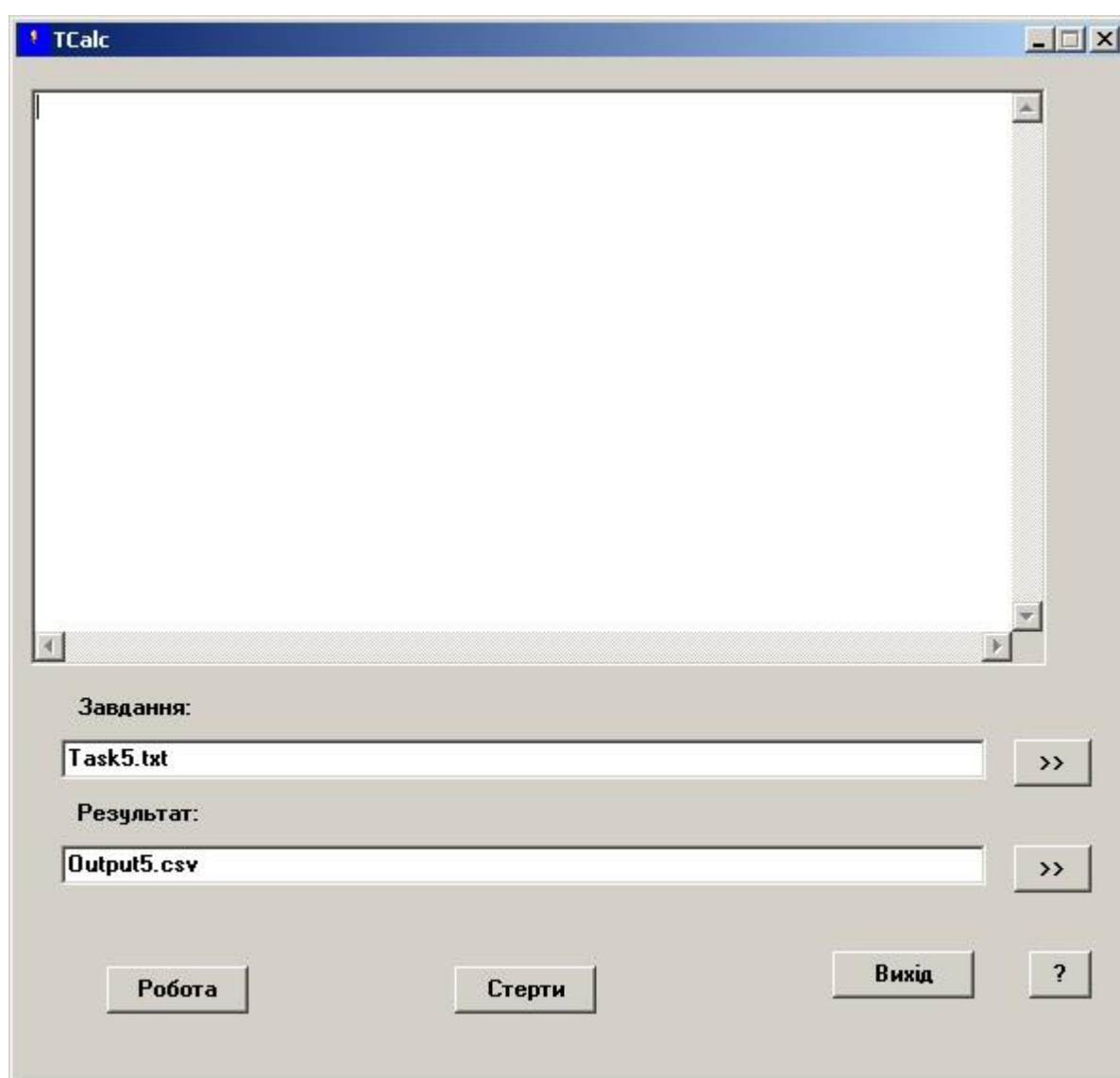


Рисунок 3.20 – Головне вікно програми TCalc

У вікні програми присутні два слоти, у яких вказується назва файлу завдання та файл для запису обчислених значень. Праворуч від слотів знаходяться кнопки, які відкривають діалогові вікна для пошуку відповідних файлів. У центрі вікна знаходиться слот для багаторядкового текстового виводу, де відображується допоміжна інформація при роботі програми та повідомлення про помилки. Кнопка <Робота> запускає виконання програми, яке буде тривати або до успішного завершення завдання, або до критичної помилки, або до перевищення заданої кількості ітерацій на певному кроці циклу програми. При роботі напис на цій кнопці змінюється на <Стоп>. При повторному натисненні на кнопку виконання завдання буде перервано. Кнопка <Стерти> видаляє текст з центрального слоту програми. Кнопка <Вихід> закінчує роботу програми. Кнопка <?> виводить коротку довідку про призначення та версію програми. Керування програмою відбувається за допомогою файлів завдання, у яких наведено геометричні розміри каналів теплообмінника, кількість каналів, початкові температури носіїв, максимальна кількість ітерацій алгоритму, витрати теплоносіїв, режим розрахунку, крок зміни відповідної величини у циклі, кількість кроків у циклі. Кожен рядок, який починається з двох символів //, вважається коментарем і ігнорується програмою. Далі наведено приклад файлу завдання.

```
18.0,12.5,0.3,0.04,14,14
```

```
//a,b,h,dh,n1,n2
```

```
//a,b,h - ширина, довжина, висота каналу, см
```

```
//dh - товщина стінок, см
```

```
//n1,n2 - кількість каналів гарячого та холодного повітря
```

```
25.0,20.0,100,5.0
```

```
//T1,T2,Iter,dT
```

```
//T1,T2 - температура гарячого та холодного теплоносіїв, градуси Цельсія
```

```
//Iter - максимальна кількість ітерацій алгоритму
```

//dT - допустиме розходження прийнятого та розрахованого значення, проценти

1.0,1.0

//V1,V2

//V1,V2 - витрата гарячого та холодного теплоносіїв, літри за секунду

1,1.0,150

//Mode,Delta,Number

//Mode - режим роботи

//1 - змінюється температура гарячого теплоносія

//2 - змінюється температура холодного теплоносія

//3 - змінюється витрата гарячого теплоносія

//4 - змінюється витрата холодного теплоносія

//5 - змінюються витрата гарячого та холодного теплоносіїв одночасно

//Delta - крок зміни вибраної величини

//Number - кількість кроків у циклі

У файлі TCalc.cfg зберігаються основні налаштування програми. У першому рядку – ціле число, 1 – режим налагодження, вся допоміжна інформація крім текстового слота зберігається у файлі Journal.txt, 0 – файл не ведеться. Другий і третій рядок – останні використані назви файлів завдань та файлів для збереження результатів. Далі, у кожному наступному рядку, ідуть назви таблиць для знаходження коефіцієнта  $K_0$  для заданого числа Рейнольдса у перехідному режимі руху теплоносія [41], теплоємність матеріалу пластин теплообмінника в залежності від температури (у нашому випадку – дюралюміній), теплові параметри теплоносія в залежності від температури (у нашому випадку повітря, параметри взято з таблиці П2.1 у роботі [41]). Вихідний файл – це текстовий файл, у якому кожне значення у рядку відділяється від інших за допомогою коми. Кожен рядок відповідає одному кроку циклу розрахунку. Такий формат дозволяє легко будувати графіки залежності розрахованих даних за допомогою стандартних програм, таких як Excel, Origin та інших. У кожному рядку вихідного файлу знаходяться такі дані – номер рядка, витрати гарячого теплоносія, витрати

холодного теплоносія, початкова температура гарячого теплоносія, кінцева температура гарячого теплоносія, початкова температура холодного теплоносія, кінцева температура холодного теплоносія, NTU – безрозмірний коефіцієнт теплопередачі, E – ефективність теплообмінного апарату для протитечія, режим руху гарячого теплоносія (1 – ламінарний, 2 – перехідний, 3 – турбулентний), режим руху холодного теплоносія.

Програма I7019 призначена для роботи з модулем АЦП ICP-CON I-7019. Програма I7019 використовується для конфігурації та перевірки роботи модулів АЦП типів I-7017, I-7019 та I-7019. Програма дозволяє налаштувати параметри каналу зв'язку, вибрати тип модуля, дозволяти або забороняти окремі канали АЦП (тільки для I-7019), вибрати чутливість кожного каналу (модуль I-7019) або всього модуля (I-7017, I-7018), безпосередньо посилати запити у модуль і читати його відповідь. Параметри налаштування програми зберігаються у файлах I7019.ini (основні налаштування програми) та Com.ini (список команд для безпосереднього запису у модуль). При запуску програми на екрані з'являється вікно, показане на (рис. 3.21)

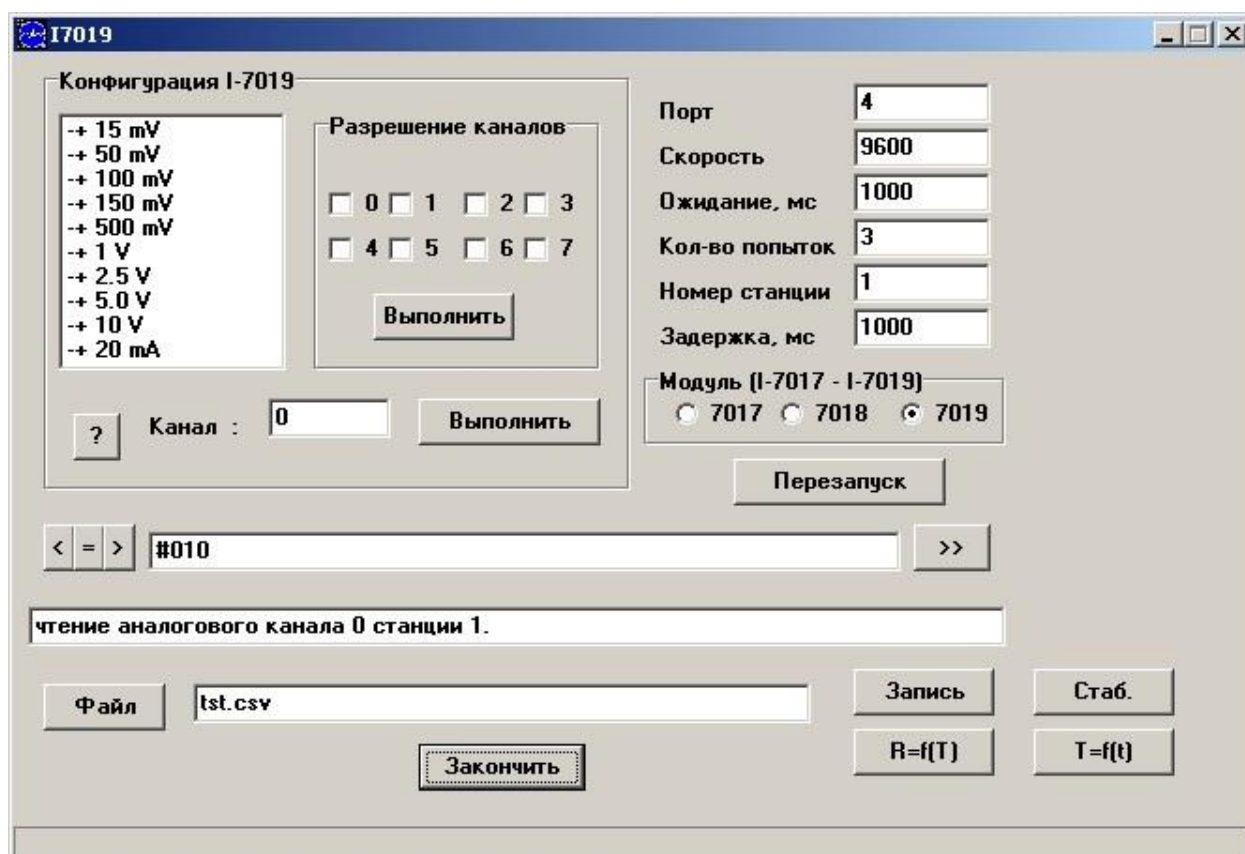


Рисунок 3.21 – Основне вікно програми I7019

Крім цього, програма I7019 має деякі спеціалізовані функції для роботи зі стендами, які було розроблено нами на базі модулів АЦП ICP-CON. Це можливість записувати у текстовий файл значення з заданих каналів з заданою періодичністю (кнопка <Запись>), знімати залежність опору від температури 4-зондовим методом (кнопка <R=f(T)>), керувати стабілізатором температури релейного типу (кнопка <Стаб.>). Для використання у стенді теплообмінника-рекуператора ми додали функцію запису чотирьох значень температур, які вимірюються напівпровідниковими термометрами типу LM35DZ. Для запуску цього режиму використовується кнопка <T=f(t)>. Період зчитування даних задається у слоті <Задержка.мс>. Додаткові параметри режиму задаються у файлі Tt.ini. У першому рядку – чотири номери використовуваних каналів АЦП, у другому – 4 додаткових множника для прочитаних даних напруги, далі – 4 рядки для індивідуального налаштування каналів, вони складаються з двох значень,

множник і додток (зміщення нуля), при допомозі цих величин напруга на датчику перераховується у температуру.

Приклад файлу Tt.ini.

0,1,2,3

1000.0,1000.0,1000.0,1000.0

0.1,0.0

0.1,0.0

0.1,0.0

0.1,0.0

Вихідний файл – текстовий, у кожному рядку значення відділяються одне від одного комами. Перше значення – номер рядка, друге – час вимірювання значень у цьому рядку у мілісекундах від початку запису, далі чотири значення напруги на датчиках, потім чотири відповідні значення температури. Назва файла для запису вихідних даних вказується у слоті <Файл>.

Програма для контролера Arduino Mega 2560 – файл Termo.ino, призначена для роботи контролера з аналоговими термометрами LM35DZ, датчиком якості повітря MQ135, цифровим датчиком вологості та температури DHT11. Датчики використовують внутрішні 10-бітні АЦП контролера, MQ135 - АЦП та цифровий вхід для компаратора, DHT11 – спеціалізований однопровідний цифровий інтерфейс, реалізований програмно у бібліотеці підтримки датчика. Датчики дозволяють контролювати температуру, вологість і якість повітря у приміщенні і температуру повітря за межами приміщення. Також програма керує двома електромагнітними реле, до яких підключені кулери та нагрівач. Реле приєднані через ключі у мікросхемі ULN2003AN до цифрових виходів контролера. Плата керується з персонального комп'ютера за допомогою послідовних каналів зв'язку. При налаштуванні контролера використовується UART0 – при живленні плати безпосередньо від USB комп'ютера в режимі налаштування, при роботі від автономного джерела живлення використовується UART1, який через перетворювачі UART у RS-485 та RS-485 у USB приєднується до комп'ютера.

Канал зв'язку працює у напівдуплексному режимі, швидкість обміну 9600 Бод. Розроблений нами протокол обміну дозволяє отримувати дані з усіх підключених датчиків і включати та виключати кулери та нагрівач.

Програма Thermometer призначена для зв'язку та керування контролером Arduino Mega 2560, запрограмованим так, як вказано вище. Зв'язок відбувається по інтерфейсу RS-485 за допомогою перетворювача USB у RS-485. Для програми драйвер перетворювача видно як віртуальний послідовний порт. Програма Thermometer підтримує протокол обміну з контролером Arduino і дозволяє отримувати данні з усіх датчиків, підключених до контролеру, а також керувати нагрівачем та кулерами. Є можливість циклічного зчитування даних з датчиків температури і зберігання їх у текстовому файлі. Також програма може працювати у режимі стабілізатора температури релейного типу. У цьому випадку задаються два значення температури, різниця між якими складає приблизно від 0,5 до декількох градусів. Коли температура у внутрішньому об'ємі стенду, який імітує житлове приміщення, стає нижчою за нижню межу, включається нагрівач, який працює, поки температура не перейде верхню межу. Після цього вмикаються кулери, які охолоджують повітря до нижньої межі – вважається, що зовнішня температура нижча, ніж у внутрішньому об'ємі. Різниця температури між верхньою та нижньою межами дозволяє компенсувати затримки часу, які виникають між включенням нагріва та охолодження і реальною зміною температури повітря, а також невеликі помилки датчика температури. Різниця температури запобігає занадто частому переключенню електромагнітних реле – так званий брязкіт контактів, і збільшує час експлуатації обладнання. Для роботи стабілізатора використовуються значення температури з датчика температури та вологості DHT11, які більш точні, ніж значення аналогових датчиків LM35DZ. Один з аналогових датчиків розміщується у внутрішньому об'ємі стенду на деякому віддаленні від датчика DHT11 і дозволяє контролювати різницю температури у об'ємі. Другий датчик вимірює температуру зовнішнього повітря. Значення вологості та якості повітря носять інформаційний характер і у роботі

стабілізатора не використовуються. При запуску програми на екрані з'являється вікно, показане на (рис.3.22).

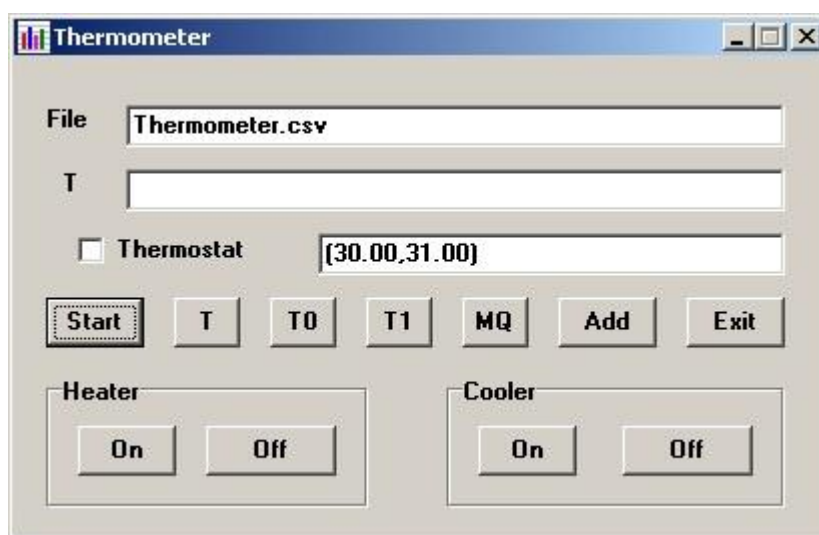


Рисунок 3.22 – Основне вікно програми Thermometer

У слоті <File> задається назва файлу для запису вихідних даних. Слот <T> призначений для відображення даних, які зчитуються з датчиків. Елемент інтерфейсу <Thermostat> переключає режими термостабілізації та простого циклічного зчитування даних, у слоті біля нього відображено значення нижньої та верхньої меж стабілізації температури. Кнопка <Start> запускає режим термостабілізації або циклічного зчитування даних. Після цього на ній з'являється напис <Stop>, повторне натиснення на кнопку завершує цикл роботи. Кнопка <T> призначена для зчитування даних з датчика DHT11. Кнопки <T0> та <T1> працюють з першим та другим аналоговими датчиками LM35DZ відповідно. Кнопка <MQ> дозволяє прочитати значення якості повітря з датчика MQ135. Кнопка <Exit> завершує виконання програми. У рамці <Heater> кнопки <On> та <Off> керують роботою нагрівача, у рамці <Cooler> кнопки <On> та <Off> включають та вимикають кулери. Ці кнопки при роботі у режимі термостабілізації не працюють, їх натиснення ігнорується. Кнопка <Add>

викликає вікно прямого керування виходами контролера, показане нижче на (рис. 3.23).

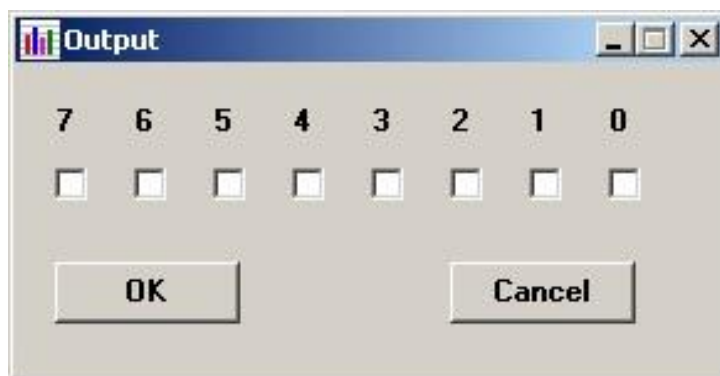


Рисунок 3.23 – Вікно для безпосереднього керування виходами контролера

Діалогове вікно дозволяє безпосередньо керувати виходами контролера. У ньому задано 8 виходів, станом яких можна керувати. Відмічений вихід переходить у стан “включено” (напруга 5 В), не відмічений – “виключено” (0 В). Виходи 0 та 1 відповідають за роботу нагрівача, виходи 2 та 3 – кулерів, інші виходи зарезервовано для подальшої розробки стенду.

Режими роботи програми зберігаються у файлі Thermometer.ini. У ньому зберігаються налаштування послідовного порту, період опитування датчиків, корекція зсуву нуля для датчиків LM35DZ (при необхідності) і налаштування цифрових виходів для керування нагрівачем та кулерами. Вихідні дані записуються у текстовий файл, у якому значення розділяються комами. У кожному рядку вказано номер рядка, час у мілісекундах від початку запису, температура з датчика DHT11. Далі, коли запущено режим термостабілізації, іде індикатор роботи нагрівача – 1, або кулера – 0. У режимі циклічного запису цей індикатор відсутній. Потім ідуть значення з першого та другого датчиків LM35DZ.

### **Висновки до III-го розділу**

Наведено характеристики комплектуючих елементів, які були використані для побудови експериментальної моделі. Розроблені та представлені схеми, за якими було побудовано експериментальну модель пластинчатого рекуператора. Розроблено електронну схему контролю процесу вентиляції в модельованому приміщенні, а також програмне забезпечення контролю фізичних процесів при перенесенні теплоносія в рекуператорі.

## ВИСНОВКИ

Під час даної роботи було виготовлено експериментальну модель пластинчатого рекуператора, розроблено електронну схему керування процесу вентиляції в модельованому приміщенні, а також програмне забезпечення контролю фізичних процесів при перенесенні теплоносія в рекуператорі.

Отримані результати носять якісний характер, оскільки прийнята нами теплофізична модель має досить приблизний характер. Розраховані графіки дозволяють оцінити температури теплоносіїв на виході теплообмінника та ефективність теплообмінника та обрати оптимальний режим роботи. При необхідності можна змінювати не тільки початкові температури теплоносіїв та їх витрати, а й геометричні розміри й матеріал пластин теплообмінника. За допомогою побудованої модельної установки отримано та проаналізовано графіки взаємозалежностей фізичних параметрів відповідних процесів, які дають можливість оптимізувати енерговитрати при використанні подібного обладнання для енергозберігаючої вентиляції приміщень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1996. – 285 с.
2. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Чинний від 01.01.1976. – К. : Міждержавні стандарти, 2004.– 4 с.
3. Кейс В.М. Компактные теплообмінники / В.М. Кейс, А.Л. Лондон. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 223 с.
4. Иванов О.П. Пластинчатые теплообменные аппараты для холодильных машин / О.П. Иванов, В.А. Дюндин, В.О. Мамченко. – М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1985. – 41с.
5. Приданцев А.С. Пластинчатые теплообменники [Текст]: метод. вказівки / А.С. Приданцев, А.А.Сагдеев. – Н.: КГТУ, 2010. – 48с.
6. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники / Н.В. Барановский, Л.М. Коваленко, А.Р. Ястребецкий . – М: Машиностроение, 1973. – 288 с.
7. Вязлов Р.Й. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості / Р.Й. Вязлов, Ю.І. Сидоров, В.П. Новіков. – Львів: «Інтелект-Захід», 2008. – 736 с.
8. Коваленко Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л.М. Коваленко , А.Ф.Глушков. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
9. Барвін О.І. Конструювання і розрахунок сталевих зварних посудин та апаратів. Фланцеві з'єднання : навч. посібник / О.І. Барвін, І.М. Генкіна, В.В. Іванченко. – Луганськ.: Східноукраїнський університет імені Володимира Даля, 2007. – 306 с.
10. Мамченко В.О. Пластинчатые теплообменники в низкотемпературной технике и биотехнологических процессах:учеб. пособие / В.О. Мамченко, А.А. Малышев – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 116 с.

11. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для техникумов / И.Л. Иоффе. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.
12. Коптева В.Б. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчёт на прочность: методические указания / В.Б. Коптева, А.А. Коптев. – Тамбов .: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. –24 с.
13. Лащинский А.А. Конструирования сварных химических аппаратов / А.А. Лащинский. – Л.: Машиностроение, 1981. – 382 с.
14. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологи: учеб. пособие для вузов / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. –753 с.
15. Пластинчатые теплообменные аппараты /Справочник-каталог для систем теплоснабжения; науч. ред. Н.М.Зингера.–Харьков., 1995 – 60с.
16. Свистунов В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / В.М. Свистунов, Н.К. Пушняков. - Санкт-Петербург, 2007. – 225 с.
17. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
18. Внутренние санитарно–технические устройства / Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха; науч. ред. И. Г. Старовойрова. – М.: Стройиздат, 1978. – 509 с.
19. Анурьев В. И. Справочник конструктора машиностроителя в 3-х томах. Том 1-3 / В.И. Анурьев. – М: Машиностроение, 2001. – 920 с.
20. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М: Энергия, 1980. – 285 с.
21. Руководство по монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию теплообменников TS-M производства компании «Alfa Laval». – Ш.: «Alfa Laval Group», 2015. – 72 с.
22. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники. /Н.В. Барановский – М: Машиностроение, 2001. – 920 с.

23. Приступа М.М. Энергозбереження в Україні: правові аспекти і практична реалізація / М.М. Приступа, М.В. Бохонко. – Рівне: видавець О.Зень, 2011. – 104 с..
24. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков – Москва: «Химия», 2005. – 576с.
25. Соколов, В.И. Основы расчета и конструирования деталей и узлов пищевого оборудования / В.И. Соколов – Москва: «Машиностроение», 1970. – 422 с.
26. Лащинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лащинский, А.Р. Толчинский – Львів: «Машиностроение», 1970. –752 с.
27. Барвін О.І. Конструювання і розрахунок сталевих зварних посудин та апаратів. Фланцеві з'єднання : навч. посібник / О.І. Барвін, І.М. Генкіна, В.В. Іванченко. – Луганськ.: Східноукраїнський університет імені Володимира Даля, 2007. – 306 с.
28. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Издание 3-е. в 2-х книгах: часть 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский – Москва: «Химия», 2002. – 400 с.
29. Коптева В.Б. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчёт на прочность : методические указания / В.Б. Коптева, А.А. Коптев. – Тамбов .: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. –24 с.
30. Вязлов, Р.Й. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості / Ю.І. Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новіков – Львів: «Інтелект-Захід», 2008. – 736 с.
31. ГОСТ 5632–72. Стали высоколегированные и сплавы жаростойкие коррозионностойкие, и жаропрочные. Марки 24. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали

32. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л.Л., Процессы и аппараты химической технологии. Учебник в 2-х ч. / В.А. Лещенко, А.П. Готлинская. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 146 с.
33. Бельбас, І.В. Монтаж, діагностика та ремонт обладнання. Навчальний посібник / І.В. Бельбас – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. – 248
34. Каталог оборудования АльфаЛаваль для теплоснабжения и кондиционирования : каталог / Швеция. – Ш.: «Alfa Laval Group»,
35. Февралев А.А., Гибадуллина В.В. Моделирование пластинчатого теплообменника. Исследование эксплуатационных режимов / Строительство и архитектура. – 2015. – №1, том 15. – С.52-55.
36. Петли В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – 2-е изд., перера и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015.–464 с.
37. Михалев, М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств / М.Ф.Михалев – Львів: «Машиностроение», 1984. – 299 с.
38. Меньшутина Н.В, Инновационные технологии и оборудование фармацевтического производства / Н.В. Меньшутина, Ю.В. Мишина – Т.2. – М.: Издательство БИНОМ, 2013. – 480 с.
39. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ГОУ ВПО «Ивановский гос-ударственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с..
40. Саймон М. Мейкерство. Arduino и Raspberry Pi. Управление движением, светом и звуком: Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 336 с.:
41. Бухмиров В.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова. – Л.: Машиностроение, 2013. – 124 с.
42. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата / ФГБОУ ВПО

- «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 124 с.
43. Ревич Ю. В. Занимательная электроника. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.:БХВ-Петербург, 2015. – 576 с.
44. Хоровиц П., Хилл У., Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 2-е. - М.: Издательство БИНОМ 2014. - 704 с.
45. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для техникумов / И.Л. Иоффе. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.
46. Українець, А.І. Проектування типового і спеціального устаткування мікробіологічної, фармацевтичної та харчової промисловості. Навчальний посібник / А.І Українець, О.Т. Богорош, В.М. Поводзинський – Київ.: НУХТ, 2007. –148с.
47. Федоткин И.М. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификация /И.М. Федоткин, И.С. Гулый/ Киев: Арктур-А, 1998. – 415 с.
48. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин, И.Ю. Бурлай, Н.А. Рюмкин/ К: Техника, 2004. – 312 с.
49. Поляков В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. - М., Стройиздат, 1990. - 336 с.
50. Калмаков А.А., Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А.А. Калмаков - М., 1985. - 34 с.
51. Карвинен Торо, Карвинен Киммо, Валтокари Вилле. Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi.: Пер. с англ.– М.: ООО И.Д. Вильямс”: 2015. – 432 с.
52. Улли Соммер. Программирование микроконтроллерных плат ArduinoFreeduino: БХВ-Петербург: 2012. – 256 с.

53. Згуровець О.В. Эффективные методы управления потреблением электрической энергии / О.В. Згуровець, Г.П. Костенко // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – №16. – С. 25-33.