

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)

“12” 05 2021 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

освітньо – наукова програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

на тему: Дослідження фізичних процесів у системах теплообміну та

масопереносу

Виконала студентка 2-го(магістерського)рівня вищої освіти, групи ОФ-91мн

Кучер Вікторія Анатоліївна

(ПІБ)

(підпис)

Науковий керівник в.о. зав. каф. З та ЕФ, д. ф.-м. н., проф.

Решетняк Сергій Олександрович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Консультант Розділ “Апаратна та програмна модель”

с.н.с., к.ф.-м.н.Скирта Юрій Борисович

(науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Рецензент асистент кафедри ЗФ та ФТТ, доктор філософії

Майкут Сергій Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2021 року

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

Інститут/факультет фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Віталій КОТОВСЬКИЙ

(підпис) (ін[^]я, прізвище)

« 12 » 05 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Кучер Вікторії Анатоліївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Дослідження фізичних процесів у системах теплообміну та масопереносу

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

затверджені наказом по університету від «26» 03 2021 р. № 901С

2. Строк подання студентом дисертації: 17 травня 2021 р.

3. Об'єкт дослідження: теплообмінні прилади, рекупераційно-вентиляційні системи

4. Предмет дослідження процеси теплообміну у рекупераційно-вентиляційних системах

5. Перелік завдань, які потрібно розробити провести літературний аналіз за темою дисертації; створити інтерфейс контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі; створити модель рекуператора в

програмному забезпеченні Comsol; розробити макет для експериментального дослідження процесів теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах; розробити лабораторну роботу для студентів фізичних та технічних спеціальностей.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу у роботі присутні 48 рисунків та 1 таблиця.

7. Орієнтовний перелік публікацій тези на тему «Вивчення процесів керованого теплообміну в рекуператорах» до XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології: крок до майбутнього -2021» – Київ, 15 лютого 2021 року.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ	Скирта Ю.Б., с.н.с., к.ф.-м.н. ІМаг НАН та МОН України	21.09.2020 р.	30.03.2021 р.

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	02.09.2020 р.	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи	02.09.2020 р.	Виконано
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	02.09.2020 р. - 19.04.2021 р.	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	09.10.2020 р. - 12.04.2021 р.	Виконано
5	Наукові дослідження за темою МД	05.09.2020 р. -	Виконано

		10.01.2021 р.	
6	Аналіз отриманих результатів	10.01.2021 р. - 12.04.2021 р.	Виконано
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД	11.01.2021 р. – 12.04.2021 р.	Виконано
8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	13.04.2021 р. – 23.04.2021 р.	Виконано
9	Надання роботи на перевірку керівнику МД	27.04.2021 р.	Виконано
10	Отримання відгуку від керівника МД	30.04.2021 р.	Виконано
11	Перевірка МД на плагіат	05.05.2021 р.	Виконано
12	Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)	19.04.2021 р.	Виконано
13	Подання МД на рецензію	29.04.2021 р.	Виконано
14	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	14.05.2021 р.	Виконано
15	Попередній захист МД	12.05.2021 р.	Виконано
16	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	13.05.2021 р.	Виконано
17	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та ФТТ	17.05.2021 р.	Виконано
18	Відправка анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	17.05.2021 р.	Виконано
19	Остаточний захист МД	20.05.2021 р.	Виконано
20	Відправка матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	14.05.2021 р.	Виконано

Студент

(підпис)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В.А.Кучер

(ініціали, прізвище)

С.О. Решетняк

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми через велике зростання кількості рекупераційно-вентиляційних систем є нагальна необхідність в оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання та зменшенні витрат енергії в системах активної вентиляції приміщень, а також розробки зручних систем керування цими процесами. Оскільки дія подібних приладів базується на законах фізики, є потреба в розширенні програми підготовки студентів фізичних та технічних спеціальностей і створенні комплексної лабораторної роботи, яка б поєднувала побудову теоретичної моделі, створення комп'ютерної симуляції та проведення експерименту з відповідної тематики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Об'єкт дослідження теплообмінні прилади, рекупераційно-вентиляційні системи.

Предмет дослідження процеси теплообміну у рекупераційно-вентиляційних системах.

Мета роботи створення методики комплексного дослідження процесів теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах як частини програми підготовки студентів фізичних та технічних спеціальностей.

Методи дослідження використання рівнянь масопереносу та теплообміну для моделювання фізичних процесів в рекуператорах. Використання середовища Comsol для створення комп'ютерної моделі для створення відповідних процесів. Розробка програмного забезпечення для керування фізичними процесами в рекуператорах.

Задачі дослідження

- створити інтерфейс контролю фізичних процесів перенесення теплоносія в рекуператорі;
- створити модель рекуператора в програмному забезпеченні Comsol;
- розробити макет для експериментального дослідження процесів теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах;
- розробити лабораторну роботу для студентів фізичних та технічних

спеціальностей.

Наукова новизна одержаних результатів: розроблено лабораторну роботу для студентів фізичних та технічних спеціальностей, яка поєднує три методи дослідження: створення теоретичної моделі фізичних процесів теплообміну в рекуператорі; комп'ютерне моделювання та керування процесом; експериментальне дослідження.

Практичне значення одержаних результатів: можливість використання розробленої лабораторної роботи в навчальному процесі для студентів фізичних та технічних спеціальностей.

Апробація результатів дисертації: була зроблена доповідь на конференції «Нові технології: крок до майбутнього -2021».

Публікації автора МД: Кучер В.А., Решетняк С.О., Вивчення процесів керованого теплообміну в рекуператорах // Зб. праць до XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології: крок до майбутнього -2021», 15 лютого 2021 р., Київ. С. 32-34.

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

В роботі наведено: використаної літератури - 55, сторінок - 122, рисунків - 48, таблиць – 1.

ABSTRACT

Actuality of theme due to the large increase in the number of recuperation and ventilation systems, there is an urgent need to optimize the operation of ventilation equipment and reduce energy consumption in active ventilation systems, as well as the development of convenient control systems for these processes. Since the operation of such devices is based on the laws of physics, there is a need to expand the training program for students of physical and technical specialties and create a comprehensive laboratory work that would combine the construction of a theoretical model, computer simulation and experiment on relevant topics.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes

Object of research heat exchangers, recuperation and ventilation systems.

Subject of research heat exchange processes in recuperation and ventilation systems.

Purpose of work the purpose of this work is to create a methodology for a comprehensive study of heat transfer processes in recuperation and ventilation systems as part of the training program for students of physical and technical specialties.

Research methods use of equations of mass transfer and heat transfer for modeling of physical processes in recuperators. Use the Comsol environment to create a computer model to create the appropriate processes. Development of software for control of physical processes in recuperators.

Tasks of research

- to create the interface of control of physical processes of transfer of the heat carrier in a recuperator;
- create a model of the recuperator in the Comsol software;
- to develop a model for experimental research of heat exchange processes in recuperation and ventilation systems;
- to develop laboratory work for students of physical and technical specialties.

Scientific novelty of the results developed laboratory work for students of physical and technical specialties, which combines three research methods: creating a

theoretical model of physical processes of heat transfer in the recuperator; computer modeling and process control; experimental research.

Approbation of the results of the dissertation a report was made at the conference "New technologies: a step towards the future -2021".

Publications Кучер В.А., Решетняк С.О., Вивчення процесів керованого теплообміну в рекуператорах // Зб. праць до XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології: крок до майбутнього -2021», 15 лютого 2021 р., Київ. С. 32-34.

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

The article contains: used literature - 55, pages - 122, pictures - 48, tables - 1.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
Розділ 1 ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧ	22
1.1 Основні принципи та поняття тепломасообміну та теплопередач.....	12
1.1.1 Елементарні способи перенесення теплоти. Теплопровідність.....	12
1.1.2 Основні поняття і визначення тепломасообміну.....	13
1.1.3 Основні положення і поняття процесу теплообміну.....	15
1.1.4 Теплоносії.....	16
1.1.5 Механізми передачі тепла через плоску стінку.....	20
1.2 Сучасні конструкції теплообмінних апаратів.....	25
1.2.1 Призначення і класифікація теплообмінних апаратів.....	25
1.2.2 Листові теплообмінники.....	26
ВИСНОВКИ ДО 1 РОЗДІЛУ.....	43
Розділ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	44
2.1 Цілі, завдання, види лабораторних занять.....	44
2.2 Вимоги до проведення лабораторних занять.....	46
2.3 Структура лабораторного заняття та форми його проведення.....	48
2.4 Навчально-методична документація з організації лабораторних занять.....	50
2.5 Роль лабораторних робіт в навчальному процесі.....	55
2.6 Використання сучасних технологій при проведенні лабораторних робіт.....	56
ВИСНОВКИ ДО 2 РОЗДІЛУ.....	62
Розділ 3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ.....	63
3.1 Конструкція моделі та її комплектуючі елементи.....	63
3.2 Принцип роботи моделі.....	72
3.3 Програмне забезпечення.....	78
3.4 Модель рекуператора в програмному забезпеченні Comsol.....	95
3.5 Лабораторна робота.....	106
ВИСНОВКИ ДО 3 РОЗДІЛУ.....	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	115
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	117

ВСТУП

В ХХІ сторіччі настав час еволюції та оновлення застарілих технологій, час для створення нових винаходів та застосування їх на практиці. Все це необхідно, щоб досягнути високої ефективності праці людини і зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище. Вентиляційно-рекупераційні системи також стали предметом розгляду в цій еволюції. Зараз вентиляція є повсюди, на заводах, підприємствах, офісах і, звісно, у житлових будинках і вона відіграє значущу роль у створенні сприятливого мікроклімату в системі будь-якого призначення. Починаючи з 1918 року на усіх промислових підприємствах було обов'язковим встановлення вентиляційної системи, інакше підприємство не допускалось до експлуатації. Стандарт якості повітря [1-3] був введений вже через 70 років.

Часи і стандарти постійно змінюються і за останні роки змінились вимоги і до вентиляційних систем. Наприклад, раніше було достатньо просто провітрювати приміщення. Наразі ж необхідно мати автоматизовану систему контролю мікроклімату в системах. Технічна еволюція вплинула і на вентиляційно-рекупераційні системи. Рекуператор є одним з найкращих і основних засобів збереження тепла в вентиляційних системах. Це такий вид теплообмінного апарата, що надає змогу зменшити втрати тепла в системі вентиляції[4]. Повернення тепла і/або вологи повітрю, яке заходить в приміщення, його очищення, і є сенсом технології рекуперації. Будучи вмонтованим всередині припливно-витяжної системи, рекуператор є однією з найважливіших її частин. Він бере участь в процесі переміщення повітряних мас, і при цьому частково повертає тепло і вологу холодному повітрю, що заходить в систему, від теплого повітря, що з неї виходить.

Так як теплообмінні апарати все частіше використовуються, а також нормування характеристик повітря підвищується, то існує нагальна потреба в оптимізації режимів роботи вентиляційного обладнання. Через те, що багато з

вентиляційних установок є застарілими, чи працюють у неенергоефективних режимах[5], вони споживають дуже багато електроенергії.

Саме тому метою даної роботи є створення методики комплексного дослідження процесів теплообміну в рекуперативно-вентиляційних системах як частини програми підготовки студентів фізичних та технічних спеціальностей.

Розділ 1 ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧ. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

1.1 Основні принципи та поняття тепломасообміну та теплопередач

1.1.1 Елементарні способи перенесення теплоти. Теплопровідність

Тепломасообмін - це наука про закономірності перенесення теплоти і речовини в просторі.

Теплообмін - це процес перенесення теплоти від більш нагрітих тіл до менш нагрітих. Багато процесів перенесення теплоти супроводжуються перенесенням речовини - масообмін (наприклад, в техніці широко поширені процеси випаровування в пароповітряне середовище і конденсації пари з суміші «пар - повітря »)[6].

Спільний перебіг процесів теплообміну і масообміну називається тепломасообміном.

Розрізняють три елементарні, фізично різні способи перенесення теплоти:

1. Теплопровідність - це передача тепла (теплової енергії) при безпосередньому зіткненні окремих частинок тіла або окремих тіл, що мають різні температури. Суть процесу полягає в тому, що дрібні частки тіла з більш високою температурою мають велику кінетичну енергію і при зіткненні з частинками з меншою температурою віддають свою енергію, а останні її

сприймають. При цьому ніякого перенесення маси речовини не відбувається. У чистому вигляді теплопровідність може спостерігатися тільки у твердих тілах.

2. Конвекція - перенесення теплоти потоком рідини або газу внаслідок перенесення маси речовини. Кожен елемент об'єму рухомого середовища переносить теплоту при зіткненні з нагрітою поверхнею. У цьому випадку більш нагріті частинки стикаються з менш нагрітими і віддають їм частину своєї енергії теплопровідністю. Передача тепла конвекцією в поєднанні з теплопровідністю називається конвективною. Існує два види конвекції: вільна (природна), що виникає через різницю щільності середовища, і вимушена, що виникає під дією роботи вентиляторів, насосів і т.д.

3. Променистий теплообмін (випромінювання) - процес передачі тепла від одного тіла до іншого у вигляді променевої енергії, яка, потрапляючи на інші тіла, частково або повністю поглинається цими тілами і викликає їх нагрівання. При цьому присутність фізичного середовища необов'язково. Випромінювання має електромагнітну природу, причому у вакуумі енергія випромінювання поширюється зі швидкістю світла[7-8].

У природі з цих трьох способів в чистому вигляді зустрічається тільки теплопровідність в суцільних твердих тілах. Решта два елементарних способи теплообміну в чистому вигляді не зустрічаються, а разом з теплопровідністю входять до складу складних способів теплообміну, що представляють собою сукупність простих.

Теплообмін між тілами може відбуватися при сталому або несталому тепловому режимі. При сталому (стаціонарному) тепловому режимі температура в кожній точці тіла залишається незмінною з плином часу.

При несталому (нестационарному) тепловому режимі температура в кожній точці тіла змінюється з плином часу. Процеси нагрівання і охолодження продуктів в теплових апаратах і холодильних камерах відповідно протікають при нестационарних режимах.

Коефіцієнтом теплопередачі називається кількість тепла, яке передається від одного середовища до іншого через одиницю поверхні стінки в одиницю часу при різниці температур між середовищами в один градус.

1.1.2 Основні поняття і визначення тепломасообміну

Температурне поле - це сукупність значень температур у всіх точках розглянутого тіла або частини простору в даний момент часу.

Температурне поле в загальному вигляді математично можна записати як $t = f(x, y, z, \tau)$, де x, y, z – координати тіла у просторі, τ – час.

Таке поле відповідає несталою тепловому режиму теплопровідності і називається нестационарним температурним полем, так як температура змінюється в часі. Якщо тепловий режим є сталим, то температура в кожній точці поля з плином часу залишається незмінною, і таке температурне поле є функцією координат і називається стаціонарним:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \rightarrow t = f_1(x, y, z) - \text{тривимірне стаціонарне температурне поле};$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \rightarrow t = f_2(x, y) - \text{двовірне стаціонарне температурне поле};$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial y} = 0 \rightarrow t = f_3(x) - \text{одномірне стаціонарне температурне поле}.$$

Ізотермічна поверхня - геометричне місце точок, що мають в даний момент часу однакову температуру. Ізотермічні поверхні можуть закінчуватися на кордонах тіла або замикатися на самих себе, але ніколи не перетинаються (рис 1.1).

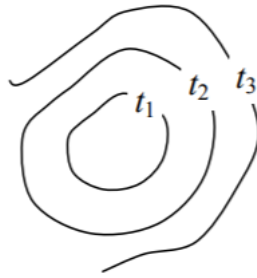


Рисунок 1.1.1– Проекції ізометричних поверхонь на площину[9]

Температурний градієнт - це вектор, спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні в бік зростання температури (рис. 1.2) і чисельно рівний похідній від температури за цим напрямком.

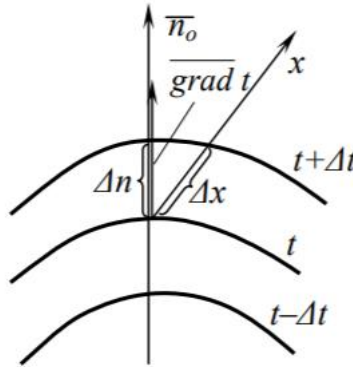


Рисунок. 1.1.2 – Температурний градієнт[9]

$$\overline{\text{grad } t} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n},$$

де \vec{n}_0 – одиничний вектор нормалі.

$$|\text{grad } t| = [^{\circ}\text{C}/\text{м}].$$

Кількість теплоти - це теплова енергія, що передається від одного тіла до іншого протягом якогось часу: $Q_{\tau} = [\text{Дж}, \text{кДж}, \text{ккал}]$.

Тепловий потік - це кількість теплоти, що передається в одиницю часу:

$$Q = [\text{Дж}/\text{с}] = [\text{Вт}] = [\text{ккал} / \text{год}].$$

Щільність теплового потоку (питомий тепловий потік) - це кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю поверхні: $q =$
 $= [\text{Дж} / (\text{с} \cdot \text{м}^2)] = [\text{Вт} / \text{м}^2]$.

Температурний напір - це різниця температур між поверхнями тіл або тілом і теплоносієм, або між теплоносіями:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

1.1.3 Основні положення і поняття процесу теплообміну

Основна мета процесів теплообміну:

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

Теплообмінник - пристрій для передачі тепла від нагрітого (рідкого або газоподібного) теплоносія до тіла з меншою температурою(холодний теплоносій)[10].

Теплоносій – це речовина, що застосовується для передачі теплової енергії. Якщо речовина, має вищу температуру, прийнято називати її гарячим теплоносієм. Речовину, яка має нижчу температуру, прийнято називати холодним теплоносієм. Оскільки основною властивістю теплоносіїв є передача теплової енергії від гарячого теплоносія до холодного теплоносія, то під час передачі енергії температура гарячого теплоносія зменшується, а відповідно, холодного збільшується. В кінці-кінців, буде однакова температура на обох носіях, але вона існує лише теоретично. На процес обміну енергії між гарячим та холодним теплоносієм діє рушійна сила.

Із законів термодинаміки відомо, що перенесення тепла від гарячих теплоносіїв до холодних теплоносіїв відбувається поступово до тих пір, доки є позитивна різниця температур між ними.

Тепловий потік - це потік енергії (в формі теплоти), обумовлений її мимовільним, незворотнім перенесенням в просторі від більш нагрітих тіл до менш нагрітих.

1.1.4 Теплоносії

Теплоносії, що віддають тепло, називають нагріваючими чи гарячими. Приймаючі тепло теплоносії називають охолоджуючими чи холодними. Теплоносії в технологічному процесі можуть виконувати основну, безпосередню функцію при передачі тепла від одного технологічного потоку до іншого. Можуть вони бути і проміжними - використовуватися як передавальна ланка при теплообміні між технологічними потоками.

У промисловості використовують рідкі, парові, газові і тверді теплоносії. Вони можуть бути різні за хімічним складом: неорганічні, органічні, солі, метали і т. д.

Теплоносій, в першу чергу, повинен забезпечувати нагрівання або охолодження технологічного потоку до заданої температури. Теплоносій повинен володіти високою енергоємністю, тобто при використанні невеликої кількості теплоносія кількість енергії, перенесеного ним, має бути значною. Для теплоносіїв, які не змінюють агрегатного стану, ця умова виконується при їх високій теплоємності та густині, а для теплоносіїв, що змінюють агрегатний стан - при високій питомій теплоті фазового переходу і щільності[11-12].

Теплоносій також повинен володіти високою транспортабельністю. У найбільшій мірі цю вимогу задовольняють текучі середовища: рідини, пари, гази. Бажано, щоб текучий теплоносій володів низькою в'язкістю. Це забезпечує низькі витрати на його транспортування, а також підвищену інтенсивність теплообміну за рахунок досягнення великих коефіцієнтів тепловіддачі. Теплоносій, що володіє високим коефіцієнтом тепловіддачі, забезпечує зниження необхідних поверхонь теплообміну, капітальних витрат на теплообмінне обладнання. Основними властивостями, які визначають високі значення коефіцієнта тепловіддачі, є високі теплопровідність, щільність і теплоємність, мала в'язкість теплоносія.

Теплоносій повинен бути безпечний у користуванні. Ця умова забезпечує його такі властивості як пожежо - і вибухонебезпечність, не токсичність, не агресивність по відношенню до конструкційних матеріалів. Теплоносій також повинен бути також хімічно і термічно стійкий, довговічний у використанні[12].

1.1.4.1 Гарячі теплоносії

Гарячі теплоносії часто використовуються в промисловості. Одним із найрозповсюдженіших гарячих носіїв є водяна пара. Такий теплоносій має дуже високу енергоємність (при конденсації 1 кг водяної пари виділяється до 2,25 МДж тепла), забезпечує високі коефіцієнти тепловіддачі, має постійну температуру при конденсації. Основним недоліком водяної пари є те, що межа практичного застосування її є обмеженою - 250 °С. При подальшому збільшенні температури тиск насиченої водяної пари різко зростає[13-14].

Водяну пару отримують в основному в спеціально призначених для цього парових котлах (парогенераторах). З метою зниження теплових втрат при

транспортуванні пар в котлах перегрівають. Перед безпосереднім використанням в теплообмінниках для забезпечення інтенсивної тепловіддачі пара повинна бути доведена до стану насичення. Переведення пари з перегрітого стану в насичений (вологе) здійснюють в парозволожувачах за рахунок уприскування конденсату.

Розрізняють нагрів глухим (через розділяючу стінку) і гострим (при безпосередньому змішуванні з нагрівачим середовищем) паром.

При обігріві глухим паром важливо забезпечити повну конденсацію пари в теплообмінниках. З метою запобігання проскакування пари в лінію відводу конденсату на цій лінії встановлюють спеціальні пристрої - конденсатовідвідники. Якщо допускається змішання конденсату пари, що гріє з нагрівачим середовищем, то ефективнішим є нагрів гострою парою.

В якості проміжних гарячих теплоносіїв використовується перегріта і гаряча вода. Перегрита вода має тиск до 20 МПа, використовуючи її можна забезпечити нагрів технологічних середовищ, матеріалів до температури порядку 350°C. Гаряча вода має температуру не вище 100°C і знаходиться під невеликим надлишковим тиском. В основному гаряча вода використовується для потреб теплофікації при безпосередньому обігріві житлових і виробничих приміщень. Безперечними перевагами води як теплоносія є її високі теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт тепловіддачі. Недоліки води як теплоносія наступні: зміна температури уздовж поверхні установки [15-17].

Мінеральні масла використовують для нагрівання технологічних середовищ при температурах нижче температури їх спалаху (як правило, до 200°C). Переваги масел - низький тиск їх насичених парів, що дозволяє вести процеси при помірних тисках. Недоліками масел є їх значна в'язкість, невисока теплопровідність, порівняно невисокі коефіцієнти тепловіддачі.

Для нагріву до температури 500 - 550°C можуть використовуватися розплави солей і їх сумішей, наприклад, легкоплавка евтектика - нітрит-нітратна суміш. Вона має високу теплопровідність, при її використанні досягаються великі значення коефіцієнта тепловіддачі. Суміш пожежо-і вибухонебезпечна.

Для нагріву до температури, що не перевищує 1000°C можуть бути використані електричні нагрівачі опору, до 400°C - індукційні. Діелектричні матеріали можуть бути нагріті струмами високої частоти, причому розігрів протікає рівномірно по всьому об'єму і з високою швидкістю. Нагрівання до 2500°C може бути здійснене за допомогою електричної дуги.

1.1.4.2 Холодні теплоносії

У виробничих умовах розрізняють два види охолодження технологічних середовищ і матеріалів: охолодження до звичайних температур - до температури не нижче температури навколишнього середовища; охолодження до низьких температур - до температури нижче температури навколишнього середовища. Для охолодження до звичайних температур застосовують в основному воду і повітря. Вода в порівнянні з повітрям має кращі теплотехнічні показники: високі теплоємність, теплопровідність і щільність, можна досягнути набагато більших коефіцієнтів тепловіддачі.

Для отримання низьких (кріогенних) температур широко застосовується киплячі рідини (при атмосферному тиску рідкий аміак кипить при мінус 34°C, рідкий діоксид вуглецю - при мінус 75°C, рідкий азот – при мінус 196°C). В якості таких холодних теплоносіїв також використовуються фреон, вуглеводневі гази.

1.1.5 Механізми передачі тепла через плоску стінку

Цей механізм складається з трьох етапів:

- Перший – це конвекція від гарячого теплоносія до поверхні стінки;
- другий – це теплопровідність;
- третій – це конвекції від поверхні стінки до холодного теплоносія.

Розглядаємо складний процес передачі тепла через плоску стінку від гарячого теплоносія до холодного. Характер зміни температур показаний на рис. 1.3. У шарі гарячого теплоносія температура змінюється від T до t_1 , по товщині стінки – від t_1 до t_2 і у шарі холодного теплоносія від t_2 до t .

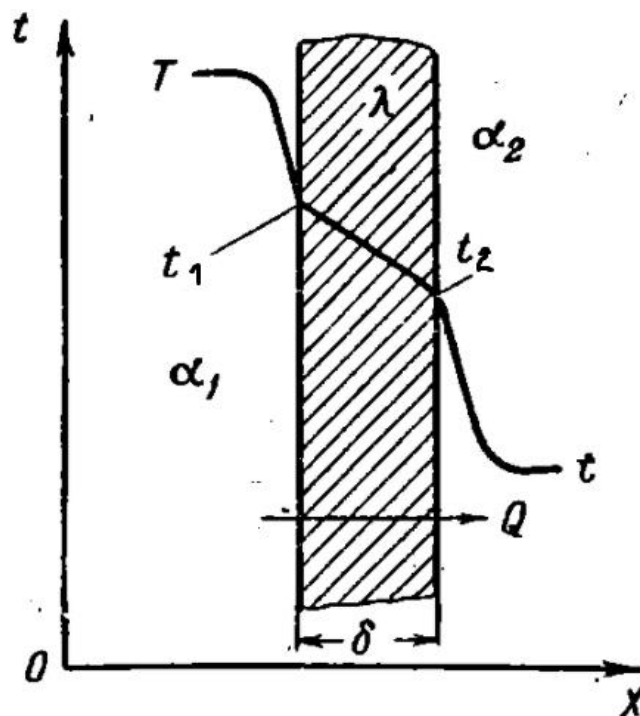


Рисунок 1.1.3 – Передача тепла через плоску стінку[18]

Рівняння передачі тепла конвекцією від гарячого теплоносія до стінки, шляхом теплопровідності через стінку і конвекцією від стінки до холодного теплоносія.

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \alpha_1 F (T - t_1) \\ Q_{\text{ст.}} &= \frac{\lambda}{\delta} F (t_1 - t_2) \\ Q_2 &= \alpha_2 F (t_2 - t) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

де α_1 та α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки і від стінки до холодного теплоносія; λ – теплопровідність матеріалу з якого зроблена плоска стінка.

Поверхня теплообміну F рівна поверхні стінки і при плоскій стінці є величиною сталою.

При встановленому процесі кількості тепла, що передаються від гарячого теплоносія до стінки (Q_1), через стінку ($Q_{\text{ст.}}$) і від стінки до холодного теплоносія (Q_2), повинні бути рівні між собою, тобто:

$$Q_1 = Q_{\text{ст.}} = Q_2 = Q$$

Із рівнянь (1.1) визначаємо $Q_1, Q_{\text{ст.}}, Q_2$:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= T - t_1 = \frac{Q}{\alpha_1 F} \\ Q_{\text{ст.}} &= t_1 - t_2 = \frac{Q}{\frac{\lambda}{\delta} F} \\ Q_2 &= t_2 - t = \frac{Q}{\alpha_2 F} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

В загальному випадку температурний напір (Q):

$$Q = T - t = \frac{Q}{kF} \quad (1.3)$$

Відношення $q = \frac{Q}{F}$, що представляє собою кількість тепла, що передається в одиницю часу через одиницю поверхні, називають густиною теплового потоку (розмірність – $вт/м^2$).

Величини $r_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ та $r_2 = \frac{1}{\alpha_2}$, що обернені до коефіцієнтів тепловіддачі, називають тепловими (термічними) опорами при переході тепла через прикордонний шар теплоносія. Аналогічно $r_{\text{ст.}} = \frac{\delta}{\lambda}$ буде тепловим опором стінки, а $r = \frac{1}{k}$ – загальним тепловим опором при переході від одного теплоносія до іншого.

Вводячи густина теплового потоку та теплові опори рівняння (1.2) можна записати у вигляді:

$$Q_1 = qr_1; Q_{ст} = qr_{ст}; Q_2 = qr_2; \quad (1.4)$$

а рівняння (1.3) у формі:

$$Q = qr \quad (1.5)$$

Так як загальний температурний напір рівний сумі часткових температурних напорів :

$$Q = Q_1 + Q_{ст.} + Q_2$$

то підставляючи значення із рівнянь (1.4) і (1.5), після скорочення на q отримаємо:

$$r = r_1 + r_{ст} + r_2 \quad (1.6)$$

Тобто загальний тепловий опір дорівнює сумі окремих теплових опорів.

Підставляючи приведені вище значення теплових опорів у рівняння (1.6), находимо

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

або

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.7)$$

Це рівняння є важливим, оскільки дозволяє порахувати значення коефіцієнта теплопередачі k , якщо відомі коефіцієнти тепловіддачі α_1 та α_2 обох теплоносіїв, а також товщина δ і теплопровідність λ .

Якщо стінка складається із декількох шарів товщиною $\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots$ з теплопровідностями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ (рис. 1.4) то теплові опори шарів будуть рівними $\frac{\delta_1}{\lambda_1}, \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \frac{\delta_3}{\lambda_3}$, а тепловий опір всієї стінки можна записати:

$$r_{ст.} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots = \sum \frac{\delta}{\lambda} \quad (1.8)$$

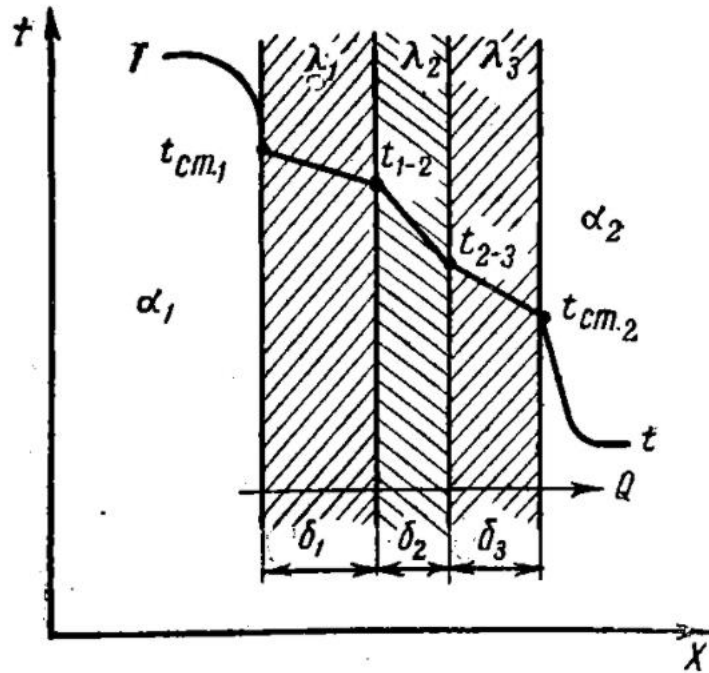


Рисунок 1.1.4 – Передача тепла через багат шарову плоску стінку[18]

В цьому випадку рівняння (1.7) має вигляд:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Із рівняння (1.6) можна побачити, що повний тепловий опір r завжди більший кожного із доданків:

$$r > r_1; r > r_{ct}; r > r_2$$

Підставивши теплові опори, отримаємо:

$$\frac{1}{k} > \frac{1}{\alpha_1}; \frac{1}{k} > \frac{\delta}{\lambda}; \frac{1}{k} > \frac{1}{\alpha_2}$$

Відповідно для обернених величин маємо:

$$k < \alpha_1; k < \frac{\lambda}{\delta}; k < \alpha_2$$

тобто коефіцієнт теплопередачі завжди менший будь-якого із коефіцієнтів тепловіддачі α_1 та α_2 .

1.1.6 Теплова ізоляція теплообмінних апаратів

Промислові теплообмінні апарати використовують теплоізоляційні матеріали для того, щоб зменшити витрати тепла, що вони виділяють в навколишнє середовище, а також енерговитрати. Також їх використовують для обмеження припливу тепла на апаратні установки з низькими температурами з навколишнього середовища. Для цього використовують різні види теплоізоляційних матеріалів та застосовують різні способи їх створення та розміщення їх на теплообмінному апараті.

Основним фактором при виборі тепло ізолюючого матеріалу є температурний діапазон цього матеріалу, а також його теплозахисні властивості. Ще обов'язково враховується температура зовнішньої стінки апарата, що ізолюється. В якості теплоізоляційних матеріалів використовують:

- Пінопласт – найпоширеніший ізолюючий матеріал через ціну та невелику масу, водостійкість, щільність. Цей матеріал майже не вразливий до грибків та цвілі, є довготривалим, але при потраплянні сонячних променів починає руйнуватися.
- Керамзит – його основними властивостями є стійкість до вологи та механічних впливів. Це екологічний матеріал, він не поступається своєю міцністю та стійкістю.
- Екструдер – це пружний, гнучкий, а також має властивість водонепроникності та дуже простий у застосуванні. Його основною важливою здатністю є це збереження теплоізоляції при екстремально низьких температурних даних.
- Різні види мінеральної вати, які відрізняються між собою лиш сировиною, із якої виготовлені:
 - скловата – із розплавленого скла;
 - кам'яна вата – із розплавлених гірських порід;

- шлаковата – із доменних шлаків.

Однією із головних особливостей мінеральної вати - це стійкість до великих температур. Також вона має хороший рівень паропроникності але водночас слабе вологопоглинання.

Для забезпечення втрат тепла протягом тривалого часу рекомендується застосувати теплоізоляційний матеріал з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Також враховується й можливість використання його на довготривалий час використання , а також вартість матеріалу.

Товщина шару теплоізоляції розраховується в залежності від призначення теплової ізоляції обладнання. На її величину впливають такі фактори: температура стінки теплообмінника; температура зовнішньої обкладинки теплової ізоляції; властивості ізоляційного матеріалу.

1.2 Сучасні конструкції теплообмінних апаратів

1.2.1 Призначення і класифікація теплообмінних апаратів

Теплообмінний апарат – це прилад, основна функція якого є передача теплоти від одного робочого середовища(гарячий теплоносіє) до іншого (холодний теплоносіє), для виконання різних теплових процесів: конденсації, нагрівання, охолодження, підвищення концентрації розчинів[19-21].

Необхідність передачі теплоти від одного теплоносія до іншого виникає в багатьох галузях техніки: енергетичній, хімічній, металургійній, нафтовій, харчовій та інших галузях промисловості.

Широке поширення теплообмінних апаратів зумовило різноманіття їх конструктивного оформлення.

Теплові процеси, що відбуваються в теплообмінних апаратах, можуть бути найрізноманітнішими: нагрівання, охолодження, випаровування, кипіння, конденсація, плавлення, затвердіння і більш складні процеси, які є комбінацією перерахованих. В процесі теплообміну може брати участь кілька теплоносіїв: теплота від одного з них може передаватися кільком і від кількох - одному.

Зазвичай розрізняються власне теплообмінники, в яких передача тепла є основним процесом, і реактори, в яких тепловий процес відіграє допоміжну роль.

Класифікація теплообмінників можлива за різними ознаками.

За основним призначенням бувають - підігрівачі, конденсатори, охолоджувачі, випарники, пароперетворювачі.

За способом передачі тепла, поділяються на поверхневі теплообмінники та контактні.

Особливістю контактних теплообмінників є контакт при передачі тепла від гарячого теплоносія до холодного теплоносія. Такий контакт відбувається при різних фазових станах, різних агрегатних станах. Фазові стани, які існують при теплообміні:

- рідина - рідина - при теплообміні між двома рідкими середовищами;
- пара - рідина - при теплообміні між парою і рідиною (парові підігрівачі, конденсатори);
- газ - рідина - при теплообміні між газом і рідиною (холодильники для повітря);
- газ – газ;
- газ – метал.

Щодо поверхневих теплоносіїв, то між гарячим та холодним середовищем розташовується пластина (поверхня теплообмінну), через яку проходить теплообмін. За принципом дії поверхневі теплообмінники поділяються на:

- рекуперативні;
- регенеративні.

В регенеративних теплообмінниках процес теплообміну між гріючим і нагріваючим середовищами відбувається наступним чином: поверхня нагріву (спеціальна насадка з цегли, кераміки, металу або іншого матеріалу) омивається гріючим теплоносієм (продукти згоряння палив, пара та інші), в результаті чого її температура підвищується. Потім подача гріючого теплоносія припиняється, а на нагріту поверхню направляється потік нагріваючого теплоносія, який забирає від неї теплоту. Далі процес повторюється[22-24].

Отже, регенеративні теплообмінники – це апарати періодичної дії. Приклади регенеративних теплообмінників - опалювальні печі, підігрівачі повітря доменних печей та інші.

У рекуперативних теплообмінниках передача теплоти від гріючого теплоносія до нагріваючого здійснюється через тверду стінку, яка їх розділяє. Принцип дії полягає у роботі теплоносіїв, які одночасно розповсюджуються по усіх сторонах поверхні теплопередач.

Кількість теплоти, переданої в рекуперативному теплообміннику від гріючого теплоносія до нагріваючого, залежить від середньої різниці температур між ними по поверхні теплообміну, або середнього температурного напору.

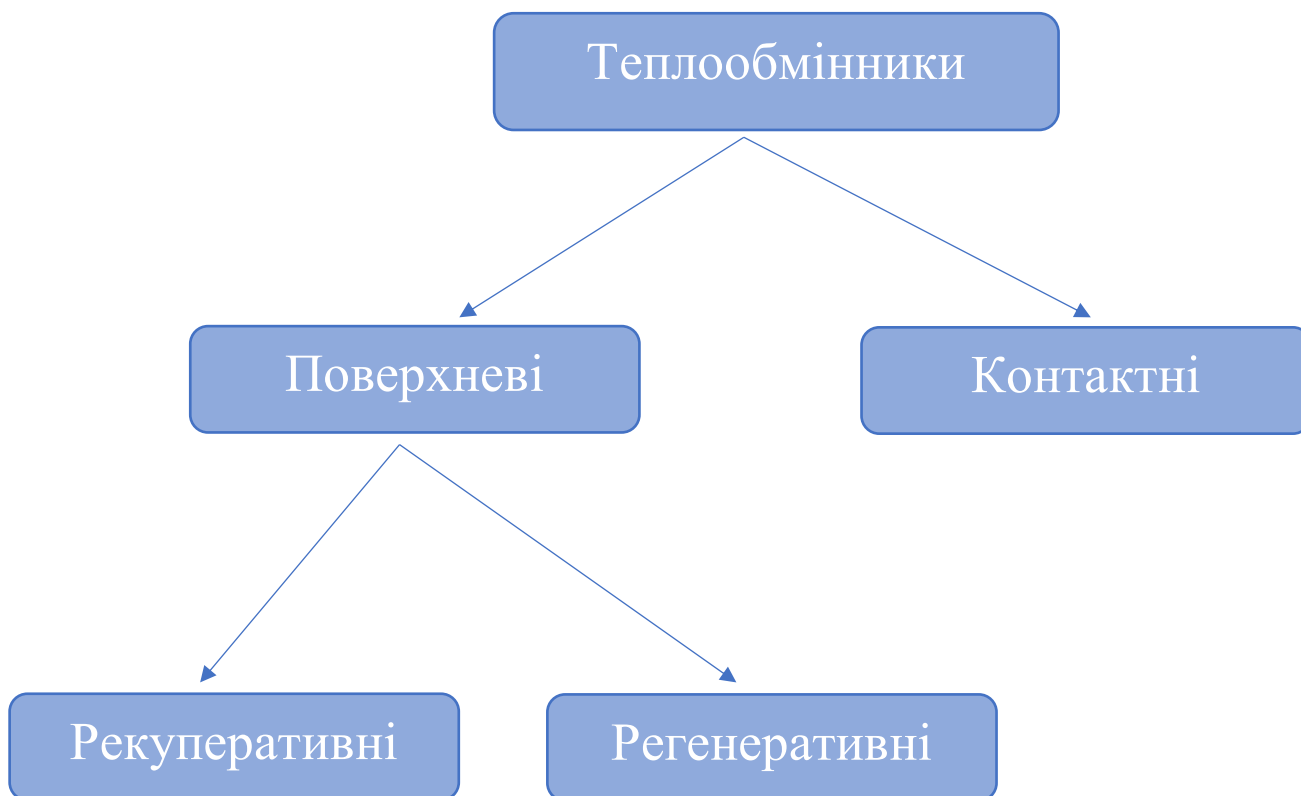


Рисунок 1.2.1 - Схема класифікації теплообмінників за функціональними ознаками

Рекуперативне теплообмінне обладнання можна поділити на види(рис.1.2.2). Для кожного виду є свої основні процеси. Обігрів холодного теплоносія до потрібної заданої температури є важливим процесом підігрівників, а охолодження тіла за допомогою холодного теплоносія є важливим процесом для холодильників. Випарникам важливе випаровування – перехід із одного стану в інший за допомогою гарячого теплоносія, що нагріває тіло до температури кипіння і випаровується. Тільки в теплообмінниках обидва процеси відіграють однакову роль[25-26].



Рисунок 1.2.2 – Схема класифікації рекуперативного обладнання теплообмінників

Ще одним критерієм є розміщення теплообмінної поверхні у теплообміннику. Поділяються на:

- похилі;
- по горизонталі;
- по вертикалі.

Наступний критерій - це вид поверхні, а саме теплообмінники листові та трубчасті. До листових відносять:

- пластинчасті;
- ребристі;
- спіральні.

До трубчастих відносяться:

- трубні;
- труба в трубі;
- кожухотрубчасті.

Однією з основних характеристик конструкції теплообмінного апарату є тип відносно руху потоків теплоносія та схема їх взаємного руху. У напрямку руху теплоносія слід розрізняти:

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

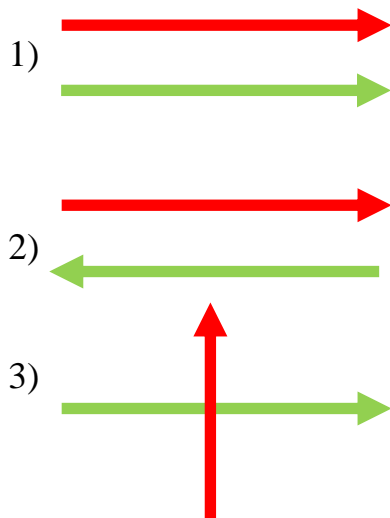


Рисунок 1.2.3 - Схеми руху теплоносіїв в теплообмінних апаратах. 1) прямоточні, б) протитік, в) перехресний потік.

1.2.2 Листові теплообмінники

Теплообмінні апарати із листів поділяють на три види, а саме:

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

Спиральні теплообмінні апарати отримали в промисловості порівняно широке поширення, що пояснюється рядом важливих переваг у порівнянні з теплообмінними апаратами інших типів. Спиральні теплообмінники можуть виготовлятися з будь-якого рулонного матеріалу, що піддається холодній обробці і зварюванню. Теплообмінники компактні, їх конструкція передбачає можливість повного протитоку. Площа поперечного перерізу каналів по всій довжині залишається незмінною, і потік не має різких змін напрямків, завдяки чому забруднення поверхні спиральних теплообмінників менше, ніж теплообмінних апаратів інших типів[27].

Спиральні теплообмінники різних конструкцій знайшли застосування для системи рідина-рідина, для системи рідина-пара у якісних конденсаторах, нагрівачах та випаровувачах, для охолодження та нагрівання парогазових сумішей. Одне із призначень спиральних теплообмінників - нагрівання та охолодження високов'язких рідин. Так як в'язка рідина проходить по одному каналу, то в результаті зникає проблема рівномірного розподілу в'язкої рідини по трубах.

Спиральний теплообмінник являє собою теплообмінник, в якому поверхня нагріву утворюється двома тонкими металевими листами, прикріпленими до розділової перегородки (керну) і згорнутими у вигляді спіралей. Спиральні теплообмінники - апарати, що складаються з 2-х каналів прямокутного перерізу, утворених згорнутими в спіралі двох листів металу. Листи служать поверхнями теплообміну. Внутрішні кінці спіралей з'єднані роздільною перегородкою, а відстань між ними фіксується штифтами(рис. 1.2.4).

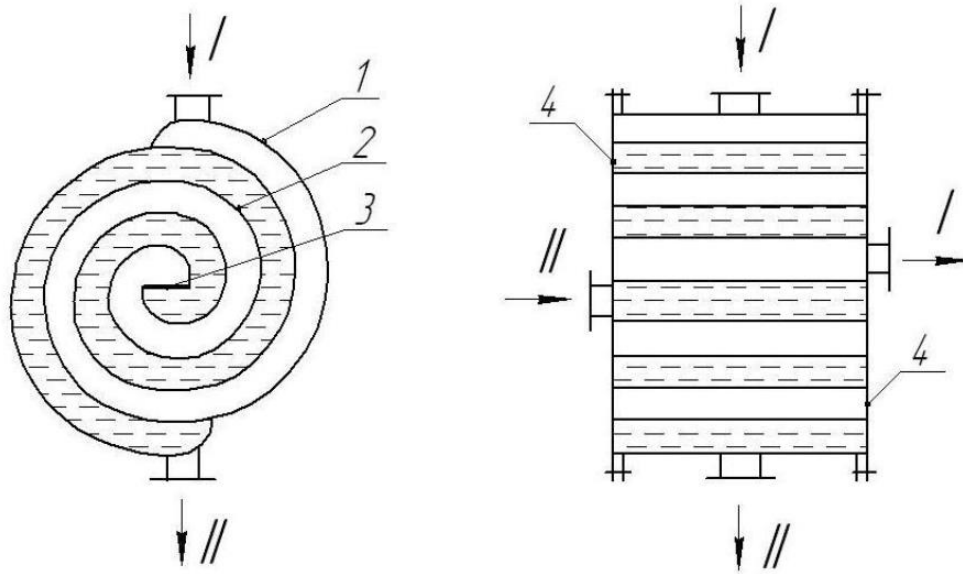


Рисунок 1.2.4 – Схема спірального теплообмінного апарату[25], де:

- 1 - лист;
- 2 - лист;
- 3 - роздільна перегородка;
- 4 - кришки;
- I, II – теплоносії

Ребристі теплообмінники застосовують для збільшення теплообмінної поверхні з тієї сторони, яка характеризується найбільшим термічним опором. Ребристі теплообмінники (калорифери) використовують, наприклад, при нагріванні паром повітря або газів. Важливою умовою ефективного використання ребр є їх щільне зіткнення з основною трубою (відсутність повітряного прошарку), а також раціональне розміщення ребр[27-29].

Ребристі теплообмінники широко застосовують в сушильних установках, опалювальних системах і як економайзери.

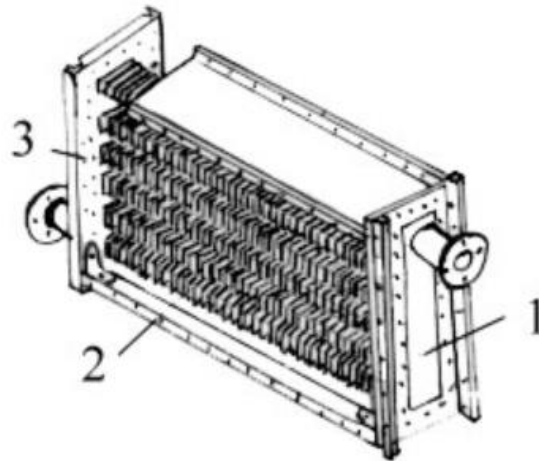


Рисунок 1.2.5 – Ребристий теплообмінний апарат[26], де:

- 1 – колектор для входу пари;
- 2 – оребрена труба;
- 3 - колектор для прийому конденсату.

Пластинчасті теплообмінні апарати є різновидом поверхневих рекуперативних теплообмінних апаратів з поверхнею теплообміну, виготовленою з тонкого листа. Найбільш широко застосовуються в промисловості розбірні пластинчасті теплообмінники. Вони складаються з окремих пластин з прокладками, пристосовані для швидкого розбирання та збирання і вся їх теплообмінна поверхня доступна для очищення. Напіврозбірні, зварні блокові і зварні нерозбірні теплообмінники є різновидами апаратів пластинчастого типу.

У напіврозбірних апаратах пластини зварені попарно і доступ до поверхні теплообміну можливий тільки з одного боку, це є недоліком даної конструкції і вимагає використання тільки чистих теплоносіїв, а також таких, що не дають відкладення з того боку теплообміну, яка недоступна для очищення.

У нерозбірних апаратах пластини зварені в блоки, а блоки з'єднані в загальний пакет. Використання даної конструкції вимагає застосування тільки чистих теплоносіїв[29].

Особливістю пластинчастих теплообмінних апаратів є конструкція і форма поверхні теплообміну і каналів для робочого середовища. Поверхня теплообміну утворюється з окремих пластин, а канали для робочого середовища мають щілинну форму. Робоче середовище рухається у поверхні теплообміну тонким шаром, що сприяє інтенсифікації процесу тепловіддачі. Форми пластин і профілі їх поверхні дуже різноманітні, а конструкції досить складні і іноді мало схожі на пластини.

Пластини розташовують паралельно один одній, причому між робочими поверхнями двох суміжних пластин створюється невеликий зазор, який утворює канал для робочого середовища, що піддається нагріванню або охолодженню.

У найпростішому випадку пластини можуть бути плоскими, з гладкими стінками і мати прямокутну, квадратну, круглу або іншу форму.

Найпростіший теплообмінник повинен мати не менше трьох пластин, що утворюють два капала, по одному з яких тече гаряче робоче середовище, а по іншому - холодне. У промислових апаратах число пластин буває великим і робочі середовища рухаються по безлічі паралельних каналів відразу[30-33].

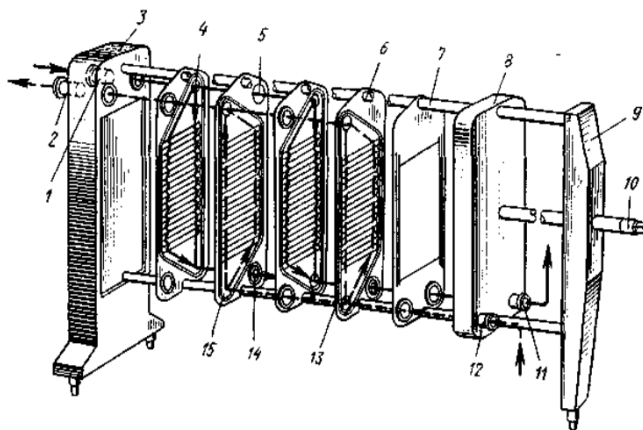


Рисунок 1.2.6 - Розбірний пластинчастий теплообмінний апарат[34]:

1, 2, 11, 12 - штуцера; 3 - передня стійка; 4 - верхній кутовий отвір; 5 - кільцева гумова прокладка; 6 - гранична пластина; 7 - штанга; 8 - плита; 9 - задня стійка; 10 - гвинт; 13 - велика гумова прокладка; 14 - нижня кутовий отвір; 15 - теплообмінна пластина.

Вже на підставі загального принципу конструювання пластинчастого теплообмінника можна зробити висновок про деякі його особливості, дуже важливих для практики. Мала товщина пластин і паралельна розстановка через короткі проміжки між пластинами дозволяє розмістити в просторі робочу поверхню теплообмінника найбільш компактно з такою «щільністю», яка недосяжна в інших типах рідинних теплообмінників. Це, в кінцевому рахунку, призводить до того, що пластинчасті теплообмінні апарати мають при рівному тепловому навантаженні значно менші габаритні розміри і металоємність, ніж апарати типу «труба в трубі», кожухотрубчасті та інші, які мають досить високу ефективність теплообміну.

1.2.3 Основи розрахунку теплообмінної апаратури

Розрахунок теплообмінників проводиться з урахуванням виду апарату і типу протікаючого в ньому процесу. Розрахунки будь-якого теплообмінного апарату включають в себе наступні види:

- тепловий розрахунок (орієнтовний і уточнений);
- гідравлічний розрахунок;
- механічний.

Мета теплового розрахунку визначити потрібну поверхню теплообміну і підібрати стандартизований апарат. Для досягнення мети виконують такі основні елементи розрахунку:

- попередній (орієнтовний) теплової розрахунок, в рамках якого визначають орієнтовну поверхню теплообміну і попередньо приймають апарат;
- уточнений теплової розрахунок; проводиться з метою уточнення поверхні теплообміну шляхом розрахунку параметрів, що характеризують процес

теплообміну - коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі з урахуванням режимів руху потоків в попередньо обраному апараті.

Гідравлічний розрахунок проводиться з метою визначення достатності тиску, створюваного насосами (компресорами) для подолання опорів, що виникають при русі потоку через апарат.

У механічному розрахунку апарату обґрунтовано вибирають матеріали для виготовлення елементів конструкції і проводять всі необхідні розрахунки на міцність, що підтверджують можливість його безпечної та тривалої експлуатації при заданих параметрах роботи (температура, тиск) і з урахуванням властивостей теплообмінюючих потоків[35-37].

1.2.3.1 Визначення параметрів теплоносіїв

1. Розрахунок середньої температури робочого середовища.

- Якщо агрегатний стан середовища не змінюється, її середню температуру приймають з урахуванням початкової (t_1) і кінцевої (t_2) температури, використовуючи формули в разі якщо $t_2 / t_1 < 2$:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1.9)$$

у випадку якщо $t_2 / t_1 > 2$:

$$t_{cp} = \frac{t_2 - t_1}{\ln(\Delta t_2 / \Delta t_1)}; \quad t_{cp} = \theta_{cp} \pm \Delta t_{cp} \quad (1.10)$$

де θ_{cp} – середня температура теплоносія;

Δt_{cp} – середня різниця температур між теплоносієм і робочим середовищем(середній температурний напір), °С.

- Для випадків випаровування і конденсації в розрахунках використовують відповідно температуру випаровування ($t_{вип}$) або конденсації ($t_{кон}$).

2. Визначення теплофізичних властивостей робочого середовища

- Для проведення теплових розрахунків в залежності від типу процесу необхідно знати щільність (ρ), в'язкість (μ), теплопровідність (λ), теплоємність (c_p) речовин (для процесів, що протікають без зміни агрегатного стану), а також теплоту випаровування ($r_{\text{вип}}$), або конденсації ($r_{\text{кон}}$), якщо агрегатний стан речовин змінюється.

3. Визначення температур теплоносіїв і їх властивостей

Як теплоносіїв використовують найчастіше гарячу воду або насичену водяну пару (для процесів нагрівання або випаровування), а також воду або повітря (для процесів охолодження або конденсації). Початкову і кінцеву температуру теплоносіїв вибирають виходячи з наступних міркувань:

- Початкову температуру води (для процесів охолодження і конденсації) приймають з урахуванням температури в мережі; в навчальних розрахунках значення цього параметра можна приймати в межах 10-20°C. Кінцеву температуру води беруть не більше 40°C (за умовами очищення води).

- Початкову температуру повітря приймають в залежності від місця розташування об'єкта. Кінцева температура повітря приймається не більше 60°C.

- Початкову температуру теплоносія (для процесів нагрівання або випаровування) приймають так, щоб був забезпечений необхідний температурний напір, і не виникали температурні деформації в апараті (розраховується з урахуванням конструкції теплообмінника). В розрахунках можна рекомендувати використовувати теплоносіїв з температурою на 20-30°C вище температури робочого середовища. При використанні водяної пари необхідно врахувати, що в апараті відбувається його конденсація без зміни температури, тобто його початкова та кінцева температура рівні[38].

4. Розрахунок середнього температурного напору

Середню різницю температур на кінцях апарату (середній температурний напір) знаходять з урахуванням прийнятих температур потоків і варіантів взаємного напрямку їх руху - прямих, протитік, змішаний або перехресний потік.

1.2.3.2 Алгоритм теплового розрахунку

Тепловий розрахунок роблять для обраного теплообмінника. Умовою цього розрахунку є задані значення площі поверхні теплообміну ($F_{\text{дійсний}}$), а також витрати обох теплоносіїв (G_1, G_2). Знайти потрібно потужність приладу (Q) і температуру теплоносіїв при виході з теплообмінника (T_1'', T_2''). Етапи розрахунку будуть такими:

1. Вказуються невідомі за завданням температури при виході з теплообмінника (T_1'', T_2''), із інтервалу ($T_2' - T_1'$).
2. Вказуються температури не заданих теплоносіїв при виході з теплообмінного обладнання, а також потужність приладу (Q).
3. Будується графіки $T = f(F)$ (температурних змін теплоносіїв вздовж поверхні обігрівання).
4. Розраховується середня різниця температур теплоносіїв ΔT .
5. Обчислюються коефіцієнти теплопередачі (k) та тепловіддачі α_1, α_2 .
6. Обчислюється площа поверхні теплообміну ($F_{\text{розрахункове}}$) з рівняння теплопередачі.
7. Порівнюються площі поверхні $F_{\text{дійсний}}$ та $F_{\text{розрахункове}}$.

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

Якщо $\Delta = \frac{|F_{\text{розрахункове}} - F_{\text{дійсний}}|}{F_{\text{дійсний}}} > 5\%$, то розрахунок повторюють знову, беручи

інше значення температур на виході одного з теплоносіїв. Такі розрахунки проводяться до тих пір, поки не буде досягнута умова. Таких спроб може бути безліч[40]. 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:

$$E = \frac{Q_1}{Q_{max}} = \frac{Q_2}{Q_{max}} \quad (1.11)$$

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 теплоємність теплообмінного апарату. Із врахуванням вираженого для всіх Q та формула (1.2.1) має вигляд для гарячого теплоносія:

$$E = \frac{G_1 \cdot c_{p.1}(T_1' - T_1'')}{W_{min} \cdot \Delta T} \quad (1.12)$$

і холодного теплоносія:

$$E = \frac{G_2 \cdot c_{p.2}(T_2'' - T_2')}{W_{min} \cdot \Delta T} \quad (1.13)$$

1.2.3.3. Конструктивний розрахунок

Конструкції теплообмінних апаратів досить різноманітні, однак існує загальна методика теплотехнічних розрахунків, яку можна застосувати для приватних розрахунків в залежності від заданих вихідних даних.

Конструктивний розрахунок виконується при проектуванні теплообмінного апарату, коли задані теплопродуктивність апарату, теплоносії, їх витрати і параметри. Метою такого розрахунку є визначення поверхні теплообміну і конструктивних розмірів обраного типу апарату. Конструктивний розрахунок складається з теплового (теплотехнічного), гідравлічного і механічного розрахунків[40-43].

Мета теплового розрахунку визначити потрібну поверхню теплообміну

і підібрати стандартизований апарат. Розрахунок теплообмінника складається з двох етапів:

1) попередній (орієнтовний) тепловий розрахунок, в рамках якого визначають орієнтовну поверхню теплообміну і попередньо приймають апарат;

2) уточнений тепловий розрахунок проводиться з метою уточнення поверхні теплообміну шляхом розрахунку параметрів, що характеризують процес теплообміну - коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі з урахуванням режимів руху потоків в попередньо обраному апараті.

Гідравлічний розрахунок проводиться з метою визначення достатності тиску, створюваного насосами (компресорами) для подолання опорів, що виникають при русі потоку через апарат.

У механічному розрахунку апарату обґрунтовано вибирають матеріали для виготовлення елементів конструкції і проводять всі необхідні розрахунки на міцність, що підтверджують можливість його безпечної та тривалої експлуатації при заданих параметрах роботи (температура, тиск) і з урахуванням властивостей теплообмінюючих потоків.

Для виконання конструктивного розрахунку необхідні наступні вихідні дані:

1) тип теплообмінного апарату (кожухотрубчастий, пластинчастий, ребристий або ін.);

2) теплоносії (газ, пара або рідина);

3) теплопродуктивність апарату: витрата одного з теплоносіїв і його початкова та кінцева температури.

По ходу виконання розрахунку визначають:

1) фізичні параметри і швидкості руху теплоносіїв;

2) витрати теплоносія з рівняння теплового балансу;

3) середню різницю температур;

4) коефіцієнти тепловіддачі і теплопередачі;

5) поверхню теплообміну;

6) конструктивні розміри апарата;

7) діаметр патрубків для входу і виходу теплоносіїв.

1.2.3.4 Методи оцінки ефективності теплообмінників

1) ККД теплообмінників

Одним з основних показників ефективності будь-якого обладнання вважається його коефіцієнт корисної дії - ККД. У цьому плані не є винятком і теплообмінні пристрої. Їх ККД залежить від різних чинників, але в першу чергу від того, наскільки вірно було зроблено розрахунок і виконано конструктивне рішення теплообмінного обладнання[44-45].

Значення ККД теплообмінника знаходять виконанням зміни температури в чотирьох різних точках на вході і виході обох середовищ.

$$\eta = \frac{T_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - T_{\Gamma}^{\text{ВИХ}}}{T_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - T_{\text{Х}}^{\text{ВХ}}} - \text{якщо розхід гарячого теплоносія менший за розхід}$$

холодного;

$$\eta = \frac{T_{\text{Х}}^{\text{ВХ}} - T_{\text{Х}}^{\text{ВИХ}}}{T_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - T_{\text{Х}}^{\text{ВХ}}} - \text{якщо розхід гарячого теплоносія більший за розхід}$$

холодного.

За допомогою термодатчиків підбирається оптимальний варіант форми пластин, розмір перетину трубопроводів, швидкості потоку і ряд інших параметрів. Всі дані враховуються при веденні розрахунку ККД теплообмінника на стадії проектування.

Для того щоб підвищити ККД теплообмінника, вдаються до розширення площі теплообміну, що тягне за собою збільшення габаритів, ваги, а звідси і вартості апаратури. Тим більше зі збільшенням габаритів підвищується загроза

утворення протікання. Тому виробники намагаються знаходити баланс між габаритними розмірами і отриманням найкращого ККД.

2) Енергетичний коефіцієнт

Енергетичний коефіцієнт $E = Q / N$ характеризує ступінь використання витраченої роботи на передачу теплоти, або тепло гідродинамічну досконалість організації процесу теплообміну при певній поверхні. Чим більше E , тим менше витрат роботи, необхідних для передачі однієї і тієї ж кількості теплоти, і тим ефективніша поверхня теплообміну. На відміну від ККД абсолютна величина енергетичного коефіцієнта не характеризує рівень тепло гідродинамічної досконалості теплообмінника. Коефіцієнт E застосовується лише для порівняння ефективності теплообмінників або поверхонь теплообміну[44-45].

ВИСНОВКИ ДО 1 РОЗДІЛУ

Теплообмін – фізичний процес, у якому енергія передається у вигляді деякої кількості теплоти від гарячого теплоносія(тіло з більшою температурою) до холодного теплоносія(тіло з меншою температурою). Теплоносій – це речовина або середовище, що переносить тепло від гарячого теплоносія до холодного теплоносія.

З даного розділу робимо такі висновки:

1. Коефіцієнт теплопровідності у твердих речовинах найбільший, оскільки вимагає, у будові своєї структури, найменших відстаней між молекулами. Коефіцієнт теплопровідності залежить від властивостей речовини та температури.
2. У рідин теплопровідність зменшується при збільшенні температури. Це можна спостерігати у всіх рідинах, окрім гліцерину, води та її розчинів. Якщо розглядати гази, то вони у своїй структурі мають найменшу відстань між молекулами, тому їхній коефіцієнт теплопровідності є найменшим. Коефіцієнт можна збільшити за рахунок підвищення температури, чим більша температура, тим більша теплопровідність.

Також у цьому розділі:

1. Проаналізовано класифікацію та призначення теплообмінних апаратів.
2. Розглянуто особливості конструкції, які можуть виникати при побудові пластинчастих теплообмінників.
3. Наведено основні види розрахунків та їх цілі.
4. Описано поетапно алгоритми теплового та конструктивного розрахунку.

Розділ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

2.1 Цілі, завдання, види лабораторних занять

Лабораторне заняття – це ефективна форма організації навчального процесу у вищому навчальному закладі, яка ґрунтується на самостійній роботі студентів,

Це така форма заняття, на якій під керівництвом викладача студент проводить природні або імітаційні експерименти чи досліди з метою підтвердження окремих теоретичних положень певної навчальної дисципліни, формує практичні навички роботи з лабораторним обладнанням, устаткуванням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень[46].

Метою лабораторного заняття є: набуття досвіду вирішення навчально-дослідних і реальних практичних завдань на основі вивченого теоретичного матеріалу; експериментальне підтвердження і перевірка істотних теоретичних положень, уміння вирішувати практичні завдання шляхом придбання навичок дослідницької роботи з перших кроків своєї професійної діяльності.

Основними завданнями лабораторних занять є:

- поглиблення рівня освоєння загальнокультурних і професійних компетенцій;
- узагальнення, систематизація, поглиблення, закріплення отриманих теоретичних знань з конкретних тем;
- формування умінь застосовувати отримані знання на практиці, реалізація єдності інтелектуальної та практичної діяльності;
- розвиток інтелектуальних умінь у майбутніх фахівців: аналітичних, проектувальних, конструктивних та ін .;

- вироблення при вирішенні поставлених завдань професійно значущих якостей (самостійність, відповідальність, точність, творча ініціатива).

За характером виконуваних студентами завдань лабораторні заняття поділяються на:

- ознайомчі, що проводяться з метою закріплення і конкретизації вивченого теоретичного матеріалу;
- аналітичні, що ставлять собі за мету отримання нової інформації на основі формалізованих методів;
- творчі, пов'язані з отриманням нової інформації шляхом самостійно обраних підходів до вирішення завдань.

Форми організації лабораторних занять визначаються в відповідність цілям навчання і можуть являти собою: рішення типових і ситуаційних завдань; проведення експерименту; заняття з моделювання реальних завдань; ігрове проектування; виїзні заняття (на виробництво, в організації сфери послуг, установи та ін.); заняття-конкурси тощо.

Лабораторні заняття не тільки закріплюють теоретичні знання, а й дозволяють студенту глибоко вивчати механізм застосування цих знань, опанувати важливим для фахівця умінням інтелектуального проникнення в ті природно-технічні або виробничі процеси, які досліджують на лабораторному занятті[47-48]. Під впливом цієї форми занять студентів часто виникають нові ідеї наукового і технічного характеру, які використовуються в курсових, кваліфікаційних, дипломних роботах. Лабораторні заняття в значній мірі забезпечують відпрацювання умінь і навичок прийняття практичних рішень в реальних умовах виробництва.

Перелік тем лабораторних занять визначається робочою програмою навчальної дисципліни.

2.2 Вимоги до проведення лабораторних занять

Приступаючи до роботи в лабораторії, студенту слід знати, що будь-яке недотримання розкладу занять і дисципліни буде вважатися порушенням його службових обов'язків. Викладач, який вперше зустрічається зі студентами на вступному занятті, повинен ознайомити їх із загальними правилами роботи в лабораторії, які вони зобов'язані неухильно виконувати.

Розроблені наступні вимоги до студентів, дотримання яких має важливе значення для виховання у них відповідального ставлення до своїх обов'язків:

1) лабораторні заняття проходять в передбачений розкладом час. Студенти, які не з'явилися на лабораторну роботу або не допущені до неї за погану підготовку, виконують роботу по додатковому розкладу за рахунок особистого часу;

2) порядок виконання лабораторних робіт визначено графіком, який вивішують на дошці оголошень в лабораторії;

3) студент, що запізнився на заняття, до роботи не допускається;

4) в лабораторії необхідно дотримуватися тиші. Розмовляти з приводу виконання роботи слід тільки врівголоса;

5) студенти повинні дбайливо ставитися до матеріальних цінностей лабораторії. У разі несправності лабораторних установок, вимірювальної апаратури і невиконання інструкцій до лабораторних робіт з вини студентів, вони несуть матеріальну відповідальність;

6) заборонено ходити по лабораторії під час занять. Виходити з лабораторії можна тільки з дозволу викладача;

7) робоче місце студента в лабораторії повинно бути в чистоті і порядку.

Під час виконання лабораторних робіт відбувається формування відповідних умінь і навичок роботи з вимірювальною апаратурою, розрахунки

окремих вузлів і процесів, формування окремих технологічних умінь і навичок, необхідних фахівцю[47-48].

Також існують загальні вимоги для виконання лабораторних робіт, а саме:

- Обсяг часу на виконання лабораторних занять відображається в навчальному плані і в робочих програмах навчальних дисциплін. Розподіл відведеного обсягу часу здійснюється викладачем відповідної дисципліни з урахуванням специфіки дисципліни, що вивчається.

- Лабораторні заняття повинні проводитися в спеціалізованих лабораторіях, відповідних санітарно-гігієнічним нормам, вимогам технічної та пожежної безпеки.

- Кількість обладнаних лабораторних місць повинно бути достатнім для досягнення цілей проведення лабораторних занять.

- Під час лабораторних занять всі повинні дотримуватися порядку і дисципліни відповідно до правил користування даною лабораторією.

- Матеріальне забезпечення повинно відповідати сучасному рівню і вимогам.

- Лабораторні заняття повинні бути забезпечені в достатньому обсязі необхідними методичними матеріалами, що включають в себе комплект методичних вказівок до циклу лабораторних робіт з даної дисципліни.

- Викладач визначає зміст лабораторних робіт, вибирає методи і засоби проведення лабораторних занять, що відповідають їх особливостям і забезпечують високу якість навчального процесу.

- Студент повинен бути на лабораторному занятті в час, встановлений за розкладом, і з необхідною попередньою підготовкою.

- Після закінчення лабораторної роботи студенти зобов'язані подати звіт викладачеві для перевірки з подальшим захистом. За погодженням з викладачем допускається подання до захисту звіту по лабораторній роботі під час наступного лабораторного заняття або в індивідуальні терміни, обумовлені з викладачем. Допускається за погодженням з викладачем подавати звіт про лабораторну роботу в електронному вигляді[48].

- В кінці лабораторного заняття викладач оцінює роботу студента шляхом перевірки звіту і (або) його захисту (співбесіди).
- Студент зобов'язаний виконати лабораторну роботу, пропущену з поважної причини, в години, узгоджені з викладачем.

2.3 Структура лабораторного заняття та форми його проведення

У вищих навчальних закладах не існує єдиної методики організування, структурування і проведення лабораторних і практичних робіт, кожен вуз рекомендує свої варіанти інструкцій, які істотно відрізняються. Однак основні положення проведення лабораторних робіт в інструкціях збігаються, оскільки охоплюють більш-менш докладні теоретичні відомості, певну кількість завдань, рекомендації по послідовності і способах виконання роботи.

Лабораторне заняття складається з наступних елементів: вступна частина, основна і заключна.

Вступна частина забезпечує підготовку студентів до виконання завдань роботи і включає в себе:

- формулювання теми, мети заняття, обґрунтування його значущості в професійній підготовці студентів;
- виклад теоретичних основ роботи;
- пояснення методів (способів, прийомів) виконання завдань;
- характеристику вимог до результату роботи;
- інструктаж з техніки безпеки;
- перевірку готовності студентів виконувати завдання;
- вказівки по самоконтролю результатів виконаних завдань студентами.

Основна частина включає процес виконання лабораторної роботи, оформлення звіту і його захист. Вона може супроводжуватися додатковими роз'ясненнями по ходу роботи, усуненням труднощів при її виконанні, поточним контролем і оцінкою результатів окремих студентів, відповідями на питання студентів.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- титульна сторінка;
- мета роботи;
- вихідні дані;
- схему виконання роботи (при необхідності);
- хід виконання роботи (при необхідності);
- результати виконання лабораторної роботи;
- висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Форми організації лабораторного заняття залежать від числа студентів, змісту та обсягу програмного матеріалу, числа лабораторних робіт, а також від місткості навчальних приміщень і наявності обладнання.

Залежно від цих умов в університеті застосовують такі форми проведення лабораторних занять:

- фронтальна;
- по циклам;
- індивідуальна;
- змішана (комбінована)

Фронтальна форма проведення лабораторних занять передбачає одночасне виконання роботи всіма студентами. Її застосування сприяє більш глибокому засвоєнню навчального матеріалу, оскільки графік виконання лабораторних робіт поставлений в чітку відповідність лекціям. При цьому забезпечується високий методичний рівень проведення робіт, так як на кожному занятті увага викладача зосереджується лише на одній роботі. Однак ця форма вимагає великої кількості однотипного, іноді дорогого устаткування і універсальних стендів, а для їх розміщення – значних лабораторних площ.

Ще однією формою організації є організація лабораторних робіт по циклам. При цьому роботи діляться на кілька циклів, які відповідають певним розділах лекційного курсу. В один цикл об'єднуються 4-5 роботи. Студенти виконують роботи за графіком, переходячи від одного циклу до іншого[48].

Організації вищої освіти, які мають великі можливості по лабораторній базі, впроваджують індивідуальну форму організації робіт, при якій кожен студент виконує всі зазначені програмою роботи в певній послідовності, яка встановлюється графіком. У цьому випадку студенти одночасно можуть працювати над різними темами. Дана форма організації лабораторних робіт має таку перевагу, що дозволяє розширити тематику і представляє студентам великі можливості для наукових досліджень.

Найбільш часто в університетах використовується змішана (комбінована) форма організації лабораторних занять, що дозволяє використовувати переваги кожної з розглянутих вище форм.

Як правило, на перших курсах застосовують фронтальну форму проведення лабораторних занять, потім переходять до циклової і індивідуальної. У всіх випадках кафедри прагнуть того, щоб кожна лабораторна робота виконувалася студентами самостійно.

2.4 Навчально-методична документація з організації та проведення лабораторних занять

Для проведення лабораторних занять викладачами розробляються методичні рекомендації щодо їх виконання. Рекомендації розробляються по кожному лабораторному занятті передбаченому робочою програмою навчальної

дисципліни, відповідно до кількості годин, вимогами до знань, умінь, навичок[49].

Методичні рекомендації для проведення кожної лабораторної роботи, як правило, містять:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета лабораторної роботи.
3. Коротке теоретичне введення, що містить основні поняття, визначення і формули (без висновків), необхідні для виконання роботи і обробки отриманих результатів.
4. Домашнє завдання студентам для підготовки до виконання лабораторної роботи.
5. Варіанти завдань на виконання роботи, в тому числі з елементами дослідження.
6. Схема установки і методика виконання роботи із зазначенням специфіки експлуатації окремих приладів і пристроїв, якщо така є.
7. Порядок виконання лабораторної роботи.
8. Зміст звіту. Вимоги до звіту.
9. Контрольні питання до заліку по лабораторній роботі.
10. Список літератури (обов'язкової, додаткової).
11. Довідкові дані, які є специфічними для даної роботи.

Мета роботи формулюється лаконічно, коротко, але досить повно відображає основний її зміст. Передбачається, що мету роботи буде досягнуто тоді, коли студент вивчить теорію, методику експерименту, пристрій і призначення приладів, навчиться спостерігати явища, вимірювати і правильно обробляти результати вимірювань, зробить необхідні висновки[47-49].

Короткий теоретичний вступ повинен містити відомості, необхідні для виконання роботи. При цьому можна посилатися і на курс лекцій. Вивчивши теоретичний вступ, студент повинен отримати достатній обсяг інформації для виконання лабораторної роботи, навіть якщо в лекційному курсі ці питання не

висвітлені. У вступі студенти знайомляться з робочою формулою роботи, яка встановлює зв'язок шуканої величини з вимірюваною.

При описі установки і методики експерименту необхідно обґрунтувати застосування певного лабораторного обладнання, коротко окреслити схему лабораторного експерименту і вказати відомості про прилади, необхідні для виконання роботи. Якщо пропонована методика експерименту не єдина, слід зазначити можливі варіанти, звернувши увагу на переваги і недоліки кожної з них. У робочому завданні подається послідовність виконання роботи, вказується, які таблиці необхідно заповнити та які графіки побудувати. Завершальний етап робочого завдання - інтерпретація отриманого результату. Питання інструкції студент використовує для самоконтролю і підготовки до заліку.

У більшості інструкцій до лабораторних робіт, які складають і використовують вузи, поміщено багато інформації, представлені вичерпні вказівки щодо їх виконання, детальну послідовність операцій та ін. Це спрощує завдання студентам. Зайві табличні дані, вміщені в інструкціях, готові параметри приладів і тд. не сприяють підвищенню активізації роботи студентів в лабораторії, творчому пошуку рішень вирішуваних завдань, знижують навчальну цінність лабораторних робіт[49].

Крім методичних рекомендацій до переліку документів для проведення кожної лабораторної роботи може входити (на розсуд викладача і рішенням кафедри) паспорт лабораторної роботи, що включає в себе опис самої лабораторної роботи, опис лабораторного макета або комп'ютерної програми з вихідними текстами програми та виконуваними файлами лабораторної роботи.

Методичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт повинні бути доступні студентам.

На підставі методичних рекомендацій по всіх лабораторних заняттях, передбачених робочою програмою, може розроблятися навчальний (навчально - методичний) посібник, призначений для студентів.

Навчально-методичний посібник має включати в себе: титульну сторінку;

вступ; зміст (послідовно перераховуються теми лабораторних робіт із зазначенням номерів аркушів, на яких починається матеріал); основна частина (методичні рекомендації виконання по кожному занятті, передбаченому робочою програмою навчальної дисципліни); висновок.

2.5 Роль лабораторних робіт в навчальному процесі

Лабораторні роботи відіграють велику роль в навчальному процесі з багатьох фундаментальних, загально інженерних і спеціальних дисциплін, які вивчаються у вищих і середніх навчальних закладах. Вони є однією з форм навчальних занять і одним з практичних методів навчання, в якому навчальні цілі досягаються при постановці і проведенні студентами експериментів, дослідів, досліджень з використанням спеціального обладнання, приладів, вимірювальних інструментів та інших технічних пристосувань. На лабораторних заняттях студенти сприймають, спостерігають, досліджують явища природи, технічні та інші процеси, вивчають об'єкти техніки, пристрій і принцип дії вимірювальної апаратури, методику вимірювань[50].

Виконання лабораторних робіт необхідно для досягнення освітніх цілей на рівні спеціальності, а також дидактичних і розвиваючих цілей навчальних дисциплін та їх складових.

Таким чином, вони забезпечують зв'язок теорії з практикою, розвивають самостійність і здатність до постановки та проведення експериментів, розуміння та інтерпретації фактів, до аналізу явищ і синтезу, до оцінки отриманої інформації, застосування знань на практиці. На рівні навчальних дисциплін лабораторні роботи забезпечують знайомство з устаткуванням, приладами,

засобами вимірювання, з методикою дослідження, поповнюючи знання фактами, вони дозволяють визначити і перевірити теоретичні залежності[50].

Дидактична роль лабораторних робіт надзвичайно велика. Сприйняття при виконанні лабораторних робіт засновані на більшій і більш різноманітній кількості чуттєвих вражень і стають глибшими і повнішими порівняно з сприйняттями при спостереженні демонстраційного експерименту. При виконанні лабораторних робіт учні вчаться користуватися фізичними приладами як знаряддями експериментального пізнання, набувають навичок практичного характеру. У деяких випадках наукове трактування поняття стає можливим лише після безпосереднього ознайомлення студентів з явищами, що вимагають відтворення дослідів самими студентами, в тому числі і під час виконання лабораторних робіт. Виконання лабораторних робіт сприяє поглибленню знань студентів з певного розділу, придбання нових знань, ознайомленню з сучасною експериментальною технікою, розвитку логічного мислення.

Лабораторні роботи мають також важливе виховне значення, оскільки вони дисциплінують учнів, привчають їх до самостійної роботи, прищеплюють навички лабораторної культури.

Залежно від завдань, що вирішуються на лабораторних заняттях, розрізняють ознайомчі, експериментальні і проблемно-пошукові лабораторні роботи.

В ознайомлювальних лабораторних роботах проводиться вивчення конструктивних особливостей, засобів виробничої діяльності (обладнання, інструментів пристосувань та ін.) та засобів дослідницької діяльності (випробувальних установок, приладів та ін.), а також їх налагодження та налаштування.

Експериментальні лабораторні роботи включають експериментальні і дослідницькі завдання. Це можуть бути завдання з вивчення та відпрацювання методики проведення різних досліджень (наприклад, методики визначення ударної в'язкості при вивченні опору матеріалів), по конструюванню, переконструюванню і де конструюванню різних схем і пристосувань (наприклад,

складання електричних схем для вимірювання властивостей об'єктів, зміна конструкцій), по дослідженню впливу різних чинників на властивості об'єктів, по визначенню ступеня відповідності експериментальних і розрахункових даних, по підтвердженню законів, закономірностей та ін.

На основі діяльнісного підходу до аналізу лабораторних робіт в їх структурі виділяють такі етапи:

- ввідно-мотиваційний;
- операційно-пізнавальний;
- контрольню-оцінний;
- заключний.

Ввідно-мотиваційний етап включає визначення і повідомлення теми лабораторної роботи, формування її дидактичної і розвиваючої мети і мотивацію мети.

Центральною ланкою лабораторної роботи є операційно-пізнавальний етап. Саме він включає підготовку до виконання практичних завдань і виконання їх. При підготовці до заняття викладач формує перелік практичних завдань і завдань, формує перелік і проектує методику актуалізації опорних знань і способів діяльності, проектує методику формування орієнтовної основи діяльності та організацію проведення лабораторної роботи. При проведенні заняття на цьому етапі повідомляється перелік задач і завдань студентам, актуалізуються опорні знання та способи дій, формується орієнтовні основи діяльності, організовується виконання дидактичного проекту даного етапу роботи, виконання студентами лабораторних завдань.

На етапі контролю і оцінки студенти проводять обробку експериментальних даних і результатів виконання лабораторних завдань, формулюють висновки, а також оцінюють ступінь досягнення цілей роботи[49-50].

2.6 Використання інноваційних технологій при проведенні лабораторних робіт

В даний час в нашому суспільстві змінився погляд на традиційний процес навчання, йде пошук нових форм і методів навчання і виховання, які б найбільш повно і правильно допомагали вирішувати виховні завдання, що стоять перед вчителями-педагогами. На сучасному етапі викладання технічних дисциплін при постійно зростаючому обсязі і складності навчального матеріалу зменшується обсяг годин, відведених на його освоєння. В таких умовах звичні для викладача форми і методи роботи вимагають перегляду і вдосконалення. З огляду на вимоги швидкого придбання і якісного засвоєння учнями інформації, а також вироблення вміння ефективно і творчо її застосовувати, назріла необхідність в принципово іншому підході до проведення лабораторних робіт. Роль викладача передбачає перехід від чисто механічного тлумачення важких місць в підручнику на аудиторних заняттях, до більш творчої співпраці з учнями та до спільного пошуку правильних рішень, при цьому доводиться приділяти більше уваги створенню сприятливих умов для самоосвіти та саморозвитку студентів.

Метою лабораторних робіт є експериментальне вивчення найбільш характерних законів і явищ, розширення і поглиблення знань, умінь і навичок з основних питань теорії та практики. Лабораторні роботи допомагають застосувати теоретичні знання, в практичній діяльності знайомлять студентів з приладами, а також з методами проведення експериментів і обробки їх результатів. Безпосередню участь в експериментах виробляє в учнів практичні навички проведення дослідів і обробці їх результатів. За отриманими результатами лабораторного дослідження студенти вчаться оцінювати різні властивості.

У той же час лабораторний практикум завжди грав і грає визначальну роль у професійній підготовці студента. В рамках виконання лабораторних робіт

природним чином вбудовуються інженерний аналіз, дослідження і проектування, при цьому інтерактивність є «природною» складовою частиною навчального процесу[50].

Одним з найбільш перспективних напрямків використання інформаційних технологій в технічній освіті та природничій освіті є комп'ютерне моделювання процесів і явищ, спрямоване на підвищення ефективності навчання. Комп'ютерні моделі легко вписуються в традиційне заняття, дозволяючи викладачу продемонструвати на екрані комп'ютера багато різноманітних ефектів, а також дозволяють організувати нові нетрадиційні види навчальної діяльності.

Основні завдання застосування комп'ютера на заняттях:

- Розвиток творчих здібностей студентів, вміння аналізувати, моделювати, прогнозувати, творчо мислити.
- Підвищення мотивації вивчення предметів.
- Вдосконалення практичних навичок студентів в роботі на ПК.
- Формування вмінь студентів здобувати знання самостійно, працюючи з програмами на комп'ютері.
- Формування вмінь учнів використовувати пакет програм для моделювання, дослідження фізичних процесів і оформлення результатів роботи.
- Здійснення диференційованого підходу до студентів при навчанні, використовуючи комп'ютер.

- В даний час кількість комп'ютерних програм, призначених для вивчення, моделювання різних процесів є дуже багато. Віртуальні моделі можуть скласти основу окремих колекцій дидактичних матеріалів.

Використання віртуальних моделей в навчанні пов'язано з вирішенням двох основних завдань.

Перша пов'язана з цілеспрямованим формуванням в студентів уміння самостійно проектувати у віртуальному середовищі найпростіші моделі об'єктів.

Друга - з їх навчанням вмінню ефективно використовувати «готові» комп'ютерні моделі для проведення віртуального експерименту.

При використанні моделей комп'ютер надає унікальну, що не реалізовується в реальному експерименті, можливість візуалізації не реального явища природи, а його спрощеної теоретичної моделі з поетапним включенням в розгляд додаткових ускладнюючих факторів, поступово наближають цю модель до реального явища[50].

В даний час лабораторний фізичний практикум за формами використання інформаційних технологій можна класифікувати наступним чином:

- автоматизований фізичний експеримент (комп'ютер виступає як одна з невід'ємних частин експериментальної установки, необхідної для управління експериментом або реєстрації даних);
- незалежний моделюючий фізичний експеримент (комп'ютер є єдиною частиною установки, моделюючи і сам фізичний процес, і прилади, необхідні для проведення дослідження);
- комплексний фізичний експеримент, що супроводжується моделюванням досліджуваних в експерименті процесів (комп'ютер, як правило, не входить в склад експериментальної установки, а використовується паралельно для порівняння отриманих результатів з теорією, але знаходиться в безпосередній близькості від установки);
- використання можливостей сучасної техніки для ефективної обробки експериментальних даних (комп'ютер може бути значно віддалений від місця експерименту, різні студенти взагалі можуть користуватися різними комп'ютерами);
- використання можливостей сучасної техніки для проведення тестового вхідного, рубіжного та підсумкового контролю під час проведення навчального експерименту.

У даній класифікації звичайний експеримент не виділено як самостійний вид, а є базовою основою для всіх представлених видів лабораторного експерименту.

Кожному з описаних вище видів експерименту як навчального засобу відповідають певні цілі і завдання. Вони ґрунтуються на використанні різних,

сформованих попередньою діяльністю, знань, умінь і навичок. Кожен вид спрямований на формування і закріплення певних знань, умінь і навичок. Якщо прибрати будь-який з перерахованих видів лабораторних робіт, то навчальний процес стане однобоким, неповноцінним. Ідеальним є використання всіх перерахованих видів у комплексі[51].

З точки зору ролі комп'ютера у експерименті значно виділяються комп'ютерні моделюючі лабораторні роботи. Тут комп'ютер є і середовищем розробки, і способом формування експериментальної установки, і можливістю формування об'єкта дослідження.

З розвитком дистанційної освіти моделюючий лабораторний практикум отримав додатковий стимул розвитку. При цьому виділився такий самостійний напрям як імітаційний експеримент, суть якого полягає не тільки в дослідженні моделі будь-якого процесу або явища, але і відтворенні зовнішнього вигляду реальної установки, на якій даний експеримент може бути виконаний.

Використання лабораторного практикуму засноване на теорії активної пізнавальної діяльності, яка стосується до комп'ютерних програм трансформується в поняття інтерактивності. Роль студента при виконанні модельованої лабораторної роботи повинна бути не просто активною. Він повинен докласти деякі розумові, зусилля для того, щоб дослідження пройшло успішно. Студент повинен подбати про те, щоб підготувати експеримент: вибрати необхідні об'єкти, оточення, прилади, при необхідності з'єднати їх належним чином, запустити експеримент. В процесі виконання експерименту необхідно отримати певні дані. Тому при розробці моделюючих лабораторних робіт необхідно «забезпечити» студента необхідним набором програмних інструментів, що імітують реальні і потенційно можливі прилади. Використання цих приладів дозволить студенту здійснити свою активну функцію.

Принцип наочності є однією з відправних точок у розробці моделюючих лабораторних робіт. Студент має можливість не тільки розібратися в запропонованій моделі, а також може побачити її образне уявлення[50-51].

Попутно можна розв'язувати завдання освоєння опосередкованої наочності, коли одночасно, наприклад, з рухом деякого тіла будується графік його координати. Навіть якщо перед студентом не ставилося завдання виявити особливості графічного опису процесу, він підсвідомо пов'язує різні точки графіка з положенням тіла. Таким чином, можна розв'язувати завдання більш продуктивного навчання студентів вмінню читати графіки.

Принцип багатоваріантності не тільки дозволяє викладачеві скоротити кількість не самостійно виконуваних робіт, але і, головним чином, показує студентам, в яких ще випадках можливе виконання даної роботи, які параметри експерименту і в яких межах можна варіювати дану модель. Причому даний аналіз може проводитися як на свідомому рівні (при фронтальному виконанні роботи), так і на підсвідомому рівні (якщо студенти виявляють інтерес до діяльності один одного).

Всі експериментальні дані, які отримують студенти в ході виконання лабораторної роботи, повинні мати реальні фізичні значення і розмірності. Віртуальні прилади, роботу яких імітує програма, можуть показувати значення тільки в тих фізичних одиницях, які реально існують. Якщо ж прилади показують значення в будь-яких відносних одиницях, рівень сприйняття такої роботи студентами відразу ж падає. Найкращий ефект, наприклад, спостерігається, коли прилад для вимірювання тривалості будь-якого процесу (секундомір) працює в реальному часі, тобто якщо ніякі технічні дані комп'ютера не впливають на тривалість процесу.

Логіка подання матеріалу у віртуальній лабораторній роботі відрізняється від реальної роботи більш детальним описом процесу дослідження, кількістю підказок і посилань, а також наявністю анімації. Віртуальна робота вимагає більшої чіткості в описі послідовності дій, тому методично обґрунтованим є уявлення такого роду робіт у вигляді певного числа розділів - вкладок, кожен з яких несе своє смислове навантаження:

1. Теоретичний матеріал.
2. Опис роботи.

3. Порядок виконання роботи.

4. Лабораторна установка.

5. Звіт.

Для успішного виконання будь-якої лабораторної роботи студент повинен ретельно опрацювати теоретичний матеріал по темі дослідження, тому в віртуальній лабораторній роботі розділ з аналогічною назвою повинен бути представлений більш детально, ніж в класичному практикумі[51].

Важливо створити обстановку, коли за моделюючою програмою студент побачить фізичне явище і перестане сприймати виконання моделюючої лабораторної роботи як роботу на комп'ютері. Для цього необхідно розробити такий інтерфейс і спосіб спілкування користувача з програмою, щоб на адаптацію до програмного продукту у студента йшло як можна менше часу.

Таким чином, сучасні мультимедійні технології дозволяють реалізовувати будь-які форми експериментальної діяльності, відкривають широкі перспективи в створенні оригінальних, а часом і принципово нових робіт лабораторного практикуму.

ВИСНОВКИ ДО 2 РОЗДІЛУ

Лабораторні роботи відіграють велику роль в навчальному процесі з багатьох фундаментальних, загально інженерних і спеціальних дисциплін, які вивчаються у вищих навчальних закладах. Вони є однією з форм навчальних занять і одним з практичних методів навчання, в якому навчальні цілі досягаються при постановці і проведенні студентами експериментів, дослідів, досліджень з використанням спеціального обладнання, приладів, вимірювальних інструментів та інших технічних пристосувань.

З даного розділу робимо такі висновки:

1. Виконання лабораторних робіт необхідно для досягнення освітніх цілей на рівні спеціальності, а також дидактичних і розвиваючих цілей навчальних дисциплін і їх складових.
2. Лабораторні роботи забезпечують зв'язок теорії з практикою, розвивають самостійність і здатність до постановки та проведення експериментів, розуміння та інтерпретації фактів, до аналізу явищ і синтезу, до оцінки отриманої інформації, застосування знань на практиці.
3. На рівні навчальних дисциплін лабораторні роботи забезпечують знайомство з устаткуванням, приладами, засобами вимірювання, з методикою дослідження, поповнюючи знання фактами, вони дозволяють визначити і перевірити теоретичні залежності.
4. Використання інноваційних технологій є невід'ємною частиною лабораторних робіт в сучасному світі. Одним з найбільш перспективних напрямків використання інформаційних технологій в технічній освіті та природничій освіті є комп'ютерне моделювання процесів і явищ, спрямоване на підвищення ефективності навчання.

Розділ 3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ

3.1 Конструкція моделі та її комплектуючі елементи

Для побудови експериментальної моделі та керування нею нами було використано досить багато різних електронних компонентів. В якості керуючого пристрою ми взяли одну з плат сімейства Arduino – Arduino Uno. Також було використано високоточний 16 бітний 8 каналний модуль АЦПІ - 7019 фірми ICP DAS.

Arduino надає можливість складати різні електронні пристрої усім бажаним, надаючи відкриту платформу з кодами програм, бібліотеками, а також даними. Оперується центральним контролером типу AVR фірми Atmel, який є 8-бітним та створений для управління різноманітними автоматичними пристроями. Доступна чимала кількість різних моделей AVR контролерів. Різниця між ними полягає у обчислювальних ресурсах, ціні, вбудованій апаратній периферії, розмірах чи електричній потужності. Tiny та Mega - два основні сімейства AVR контролерів, які чудово справляються з зовсім простими та більш складними задачами автоматизації. Різниця між ними полягає у кількості портів виводів, об'ємі програмної та оперативної пам'яті та наявності додаткових апаратних інтерфейсів. Використання даної архітектури надає можливість для розробки продуктивних компіляторів для мов високого рівня, а потім розробки програмних продуктів, що значно простіше, ніж використовувати низькорівневі мови програмування. Але розробляти прилади на AVR контролерах є не простою задачею і для спрощення цього фірмою Arduino LLC було створено платформу Arduino у 2008 році, що надала можливість працювати з контролерами не використовуючи програматор, а лише кабель USB

разом з спеціальним програмним завантажувачем. Також для новоствореної платформи було написано багато різних програм і бібліотек, що можуть бути перевикористані і надають можливість користуватись всіма можливостями контролера без усвідомлення усіх деталей його роботи. При цьому варто розуміти, що код, створений з використанням бібліотек Arduino, є менш оптимальним, чим при використанні компілятора для AVR, проте при цьому розробка стає набагато швидшою і простішою. Певно вже немає якихось дисплеїв, датчиків чи виконавчих механізмів для яких ще не створена Arduino бібліотека чи програма.

Розробка ведеться спрощеною версією C ++, писати код можна як в середовищі Arduino IDE, так і використовуючи будь-які з доступних C / C ++ середовищ. Вам знадобиться USB-кабель, щоб зв'язатись з комп'ютером, а щоб працювати автономно буде потрібний блок живлення на 7,5-12 В. Схеми Arduino зацікавлять розробників та всіх хто хоче зібрати свій прилад чи конструкцію з управлінням.

Нами було використано плату Arduino Uno на базі контролера Atmega328, яка має обчислювальні ресурси, достатні для виконання поставленої задачі. Плата має невеликі розміри (68 x 53 x 15 мм) і помірну ціну. Програмна пам'ять (flash) складає 32 Кб, оперативна – 2 Кб, енергонезалежна (eeprom) – 1Кб. Тактова частота 16 МГц. Загальна кількість виводів 14, з яких є 6 входів 10-бітного АЦП і 6 можуть використовуватись як виходи широтно-імпульсного модулятора, який можна використовувати в якості ЦАП. Є апаратна підтримка інтерфейсів I2C та SPI, що дає можливості підключати зовнішні модулі, наприклад дисплеї та зовнішні модулі АЦП. У даній реалізації плати в якості USB-UART перехідника використана мікросхема CH340, яка зарекомендувала себе стабільністю та високою швидкістю передачі даних при умові встановлених додаткових драйверів. Для Arduino Uno можна знайти велику кількість прикладів бібліотек, програм та описи різних зібраних конструкцій. Ми використовували цю плату для керування двигунами вентиляторів за допомогою

широко-імпульсної модуляції та у якості 10-бітного АЦП, використовуючи канали вбудованого в саму мікросхему Atmega328 АЦП.

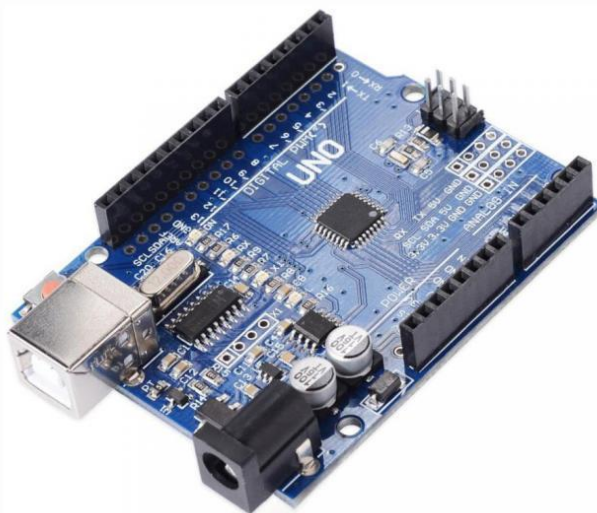


Рисунок 3.1.1 – Зовнішній вигляд плати контролера Arduino Uno

Модулі сімейства ICP-CON фірми ICP-DAS використовуються у схемах промислової автоматизації. Вони мають високу точність та захист від наводок завдяки вбудованому в них DC-DC перетворювачу напруги, який гальванічно ізолює модулі від зовнішніх електричних кіл. Зв'язок з комп'ютером відбувається за допомогою інтерфейсу RS-485. Ми використовували модуль АЦП I-7019 та модуль I-7561 – конвертор USB у RS-485. Модуль АЦП має 8 каналів, які можна індивідуально налаштовувати на напруги у межах від 10 мВ до 10 В. АЦП має розрядність 16 біт. Швидкодія модуля – 8 вимірів на секунду. Модуль I-7019 ми використовували для проведення вимірів високої точності, для більш докладного визначення параметрів теплообмінника. У разі допустимості деякої похибки і менш жорстких вимог до вимірів можна користуватись вбудованим 10-бітним АЦП модуля Arduino. Модулі сімейства ICP-CON, як усе обладнання промислової автоматизації, має досить високу ціну і не завжди може використовуватись у навчальних лабораторних стендах.

Перетворювачі інтерфейсу RS-485 у USB. Для зв'язку з комп'ютером ми використовували інтерфейс RS-485. Цей інтерфейс працює по двох будь-яких дротах, добре захищений від будь-яких завад та наводок, дозволяє працювати на великі (до декількох км) відстані. При цьому швидкість обміну по RS-485 порівняно невелика, він використовується при роботі з досить повільними вимірювальними приладами. Ми використовували два конвертера USB в RS-485, один для роботи плати Arduino, другий для модуля ICP-CON. В принципі вони можуть замінити один одного, але оскільки протоколи обміну у приладів різні, ми використовували 2 конвертера і два різні віртуальні послідовні порти. Перетворювач для Arduino виконаний на мікросхемах CH340 і MAX485. Підтримувана швидкість обміну даними від 50 до 2М Бод. Модуль RS485 виконаний в зручному пластиковому корпусі і не вимагає додаткового живлення. Перетворювач I-7561 також живиться від USB, має меншу максимальну швидкість – до 115 Кбод, оптоелектронну розв'язку вхідних та вихідних кіл і додаткові виходи на інтерфейси RS-485 та RS-422, які у нашій роботі не використовувались.



Рисунок 3.1.4 – Перетворювач інтерфейсу RS-485 у USB для модулів Arduino



Рисунок 3.1.5 – Перетворювач інтерфейсу RS-485 у USB для модулів ICP-DAS

Модуль перетворювача UART у RS-485. Цей модуль використовується з боку плати Arduino, перетворюючи TTL виходи контролера на інтерфейс RS-485. Модуль створено на основі мікросхеми MAX485 і призначений для підключення мікроконтролерів з послідовним інтерфейсом UART до промислового інтерфейсу RS-485. Модуль має входи UART, виходи RS-485 та входи керування напрямком передачі по інтерфейсу RS-485 – прийом або передача. Живлення модуля 5 В підключається до плати Arduino. Ми використовували цей модуль для зв'язку контролера Arduino Uno з персональним комп'ютером. З боку контролера Arduino використовувався послідовний порт UART і додатковий цифровий вихід для керування напрямком передачі, вихід було приєднано до перетворювача інтерфейсу RS-485 у USB, описаного вище.

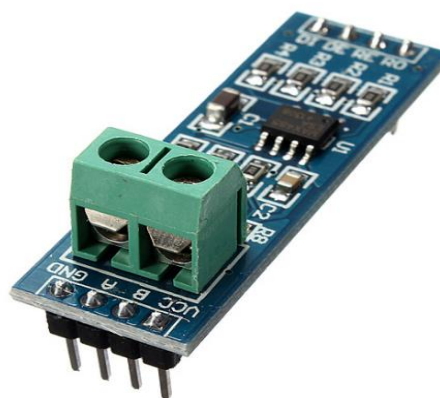


Рисунок 3.1.6 – Перетворювач інтерфейсу UART у RS-485
(з боку плати Arduino)

Модуль - ключ на силовому польовому (MOSFET) транзисторі IRF520 дозволяє перемикає потужне навантаження зі струмом до 5А та напругою до 24В. На відміну від реле транзисторний ключ не має рухомих контактів, тобто при перемиканні не виникає електрична дуга і саме перемикання відбувається набагато швидше, що дає можливість використовувати широтно-імпульсну модуляцію. Для цього на вхід модуля потрібно подати ШІМ-сигнал у формі меандру, скважність якого буде пропорційна вихідній потужності навантаження. Таким чином можна, наприклад, регулювати обороти двигуна. У нашому стенді використовується два ключа для керування двигунами вентиляторів, які рухають потоки холодного и гарячого повітря у теплообміннику. Керують двигунами виходи ШІМ Arduino, які генерують сигнал форми меандру частотою приблизно 500 Гц зі скважністю від 0 до 1, програмно скважність задається умовними значеннями від 0 до 255.



Рисунок 3.1.7 – Модуль електронного ключа на польовому транзисторі IRF520

Комп'ютерний кулер на 12В та струм до 0,16А. Призначений для охолодження деталей персональних комп'ютерів, має розміри 60x60x15 мм, може працювати цілодобово, гарантований строк експлуатації 30000 годин. Ми використовували два кулери для подачі потоків холодного та гарячого повітря у теплообмінник.



Рисунок 3.1.8 – Комп'ютерний кулер

Для живлення стенду нами використовувались два окремі блоки живлення – для вимірювальної частини (контролер Arduino та модуль I-7019) та силової частини – вентиляторів. Напівпровідникові термометри живилися від окремої гальванічної батареї напругою 9 В. Це було зроблено для підвищення точності вимірювань.

Блок живлення стабілізований. Вхідна напруга 220 - 240В змінного струму 50 / 60Гц, вихідна 12В постійного струму, 1000мА. Використано нами для живлення модулів Arduino та I-7019.



Рисунок 3.1.9 – Стабілізований блок живлення для Arduino та модуля АЦП I-7019

Джерело постійного струму Б5-47. 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. Ми використовували цей блок для живлення двох вентиляторів, які подавали повітря у теплообмінник.



Рисунок 3.1.10 – Джерело постійного струму Б5-47

У якості нагрівача повітря ми використовували фен для волосся, який має два режими підігріву повітря, середній та максимальний. У середньому режимі температура вихідного повітря до 40 градусів Цельсія, у максимальному – до 70. Живиться прилад від мережі змінного струму 220 В 50 Гц.

3.2 Принцип роботи моделі

У роботі ми досліджували процес теплообміну в повітряному пластинчатому теплообміннику. Експериментальна установка складається з пластинчатого теплообмінника, у якому потоки холодного та гарячого повітря рухаються перпендикулярно один до одного, коробки - накопичувача з екструдованого пінополістиролу розміром 60 на 60 на 60 см, яка використовується як ємність для підігрітого повітря, нагрівача повітря, електронної схеми для керування потоками повітря та вимірювання їх температури. Для побудови теплообмінника було використано 28 пластинок з

дюралюмінію розміром 175 на 132 мм та товщиною 0,4 мм. Пластинки складались паралельно одна одній, між пластинками знаходились смужки ДВП з товщиною 3 мм та шириною 25мм, які забезпечували жорсткість конструкції та однорідність отворів-щілин між ними. За допомогою смужок ДВП утворились перехресні отвори, висота кожного з них 3,2 мм та ширина 12,5 мм. Завдяки цим отворах між пластинами забезпечується два потоки повітря, між якими відбувається теплообмін. Система пластин встановлена в коробку з пінополістиролу, у коробці зроблено два входи та виходи для потоків повітря, загерметизовані один від одного та від зовнішнього середовища будівельною піною. На кожному із входів та виходів встановлено пластикову трубу діаметром 50 мм, на вхідних трубах знаходяться вентилятори, які забезпечують рух повітря у теплообміннику. Вхідна труба для гарячого повітря вставлена в коробку – накопичувач, вихідна труба подає повітря назовні – у кімнату. Повітря для холодного потоку не контактує з накопичувачем, вхідна та вихідна труби для цього потоку знаходяться у кімнаті. На входах та виходах обох потоків встановлено напівпровідникові термометри для контролю температури. Повітря у коробці – накопичувачу підігрівається за допомогою нагрівача, який має декілька режимів роботи і може забезпечувати широкий діапазон температур гарячого повітря для теплообмінника. Температура на вході потоку холодного повітря не регулюється і дорівнює температурі повітря у кімнаті. Швидкості потоків регулюються за допомогою завдання режимів роботи вентиляторів. Чисельні залежності швидкості потоку від режиму роботи вентилятора було знято окремо шляхом вимірювання часу наповнення повітрям ємності відомого об'єму – пластикового мішка, при різних режимах роботи вентилятора. Зовнішній вигляд пластинчатого теплообмінника наведено на рисунку 3.1.

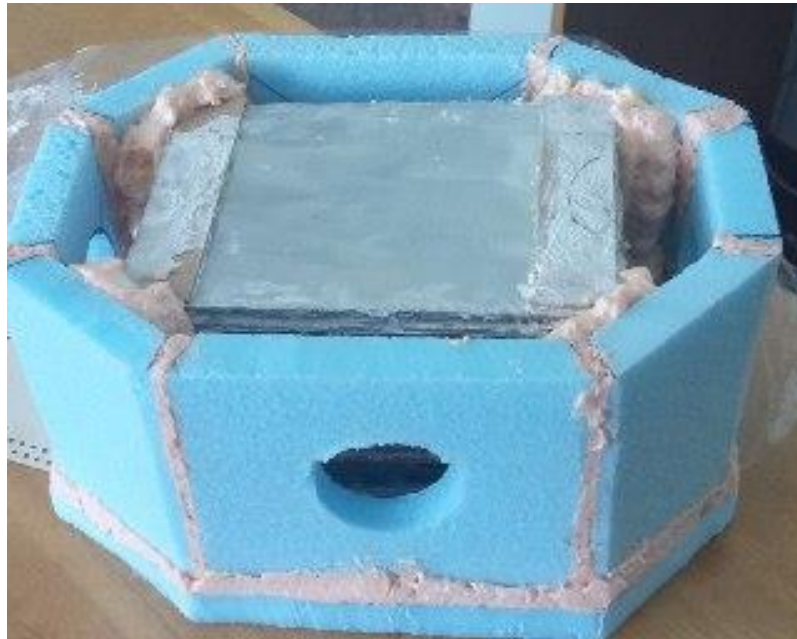


Рисунок 3.2.1 - Пластинчастий теплообмінник у процесі збирання

Схема керування потоками повітря та вимірювання температури складається з двох вентиляторів – комп’ютерних кулерів, яку забезпечують рух обох потоків повітря. Для живлення вентиляторів використано джерело постійного струму Б5-47. Керування роботою вентиляторів виконується двома ключами на потужних польових транзисторах IRF520, які працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції з використанням сигналу у формі меандру змінної скважності з частотою близько 500 Гц. Для згладжування напруги на виході ключів встановлено конденсатори ємністю 10 мкФ. Для керування ключами використовуються відповідні виходи контролера Arduino Uno. Температури потоків повітря вимірюються за допомогою аналогових напівпровідникових термометрів типу L35DZ, які дозволяють вимірювати температури у діапазоні від -55 до $+150$ °С. Термометри закріплено у пластикових трубах, по яких подається повітря для обох потоків, по одному на вхід та вихід кожного потоку. Для більш точного вимірювання температур кожен з використаних нами термометрів було прокалібровано за еталонним приладом. Для вимірювання напруги на виходах термометрів нами було використано модуль 16-бітного 8-канального АЦП типу I-7019 фірми ICP-DAS. Модуль I-

7019 широко використовується у системах промислової автоматики. Цей модуль дає можливість налаштувати потрібний коефіцієнт підсилення по кожному з каналів і забезпечує повну гальванічну розв'язку кіл живлення, кіл зв'язку і кіл вимірювання. Також нами було створено можливість для вимірювання напруги на виходах термометрів використовувати внутрішнє АЦП контролера Atmega328 плати Arduino Uno. У цьому випадку розрядність АЦП буде 10 біт, точність вимірювання температури буде значно менша, але вимірювальний стенд буде значно простіший та дешевший. На рисунку 3.2 наведено блок-схему експериментального

стенда

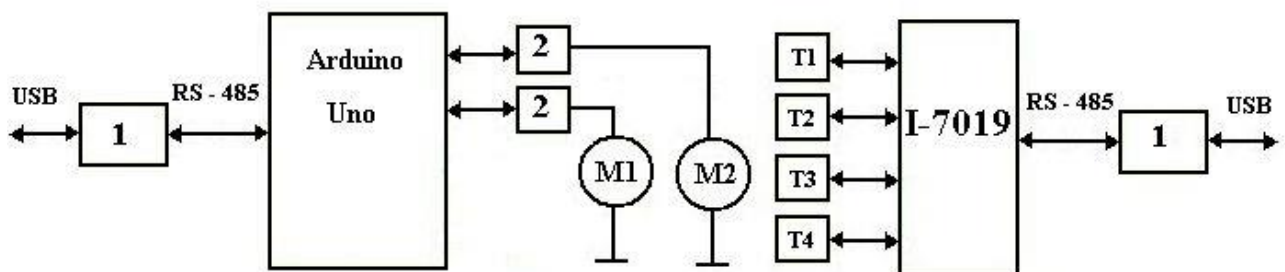


Рисунок 3.2.2 - Блок-схема експериментального стенда

Цифрами 1 позначено перетворювачі інтерфейсів RS-485 у USB. У нашому випадку для більш надійної роботи модуль АЦП I-7019 було підключено за допомогою перетворювача I-7561 фірми ICP-DAS, який забезпечує кращу гальванічну розв'язку вхідних і вихідних кіл, а плата Arduino Uno – за допомогою перетворювача RS-485 у USB фірми Arduino. В принципі ці конвертори взаємозамінні, у деяких випадках взагалі можна обійтися одним перетворювачем. З боку контролера Arduino додатково було використано перетворювач UART у RS-485. Інтерфейс RS-485 має достатню швидкість для роботи зі стендом і високу захищеність від завад. Цифрами 2 позначено ключі на польових транзисторах IRF520, які керують двигунами вентиляторів M1 та M2. Напівпровідникові термометри позначено T1, T2, T3, T4. Живлення плати Arduino Uno та модуля АЦП I-7019 відбувається від окремого джерела постійної

напруги 12 В і максимального струму 1А, таким чином використано різні джерела для силової частини – вентилятори і вимірювальної частини стенда. Для ще більшої гальванічної розв'язки і підвищення точності вимірювань термометри L35DZ живляться від окремого хімічного джерела постійної напруги – батарейки на 9 В. Беручи до уваги малий струм споживання термометрів (до 1 мА), таке можливо у лабораторних умовах. На рисунках 3.3 та 3.4 зображено вимірювальний стенд у зібраному вигляді.

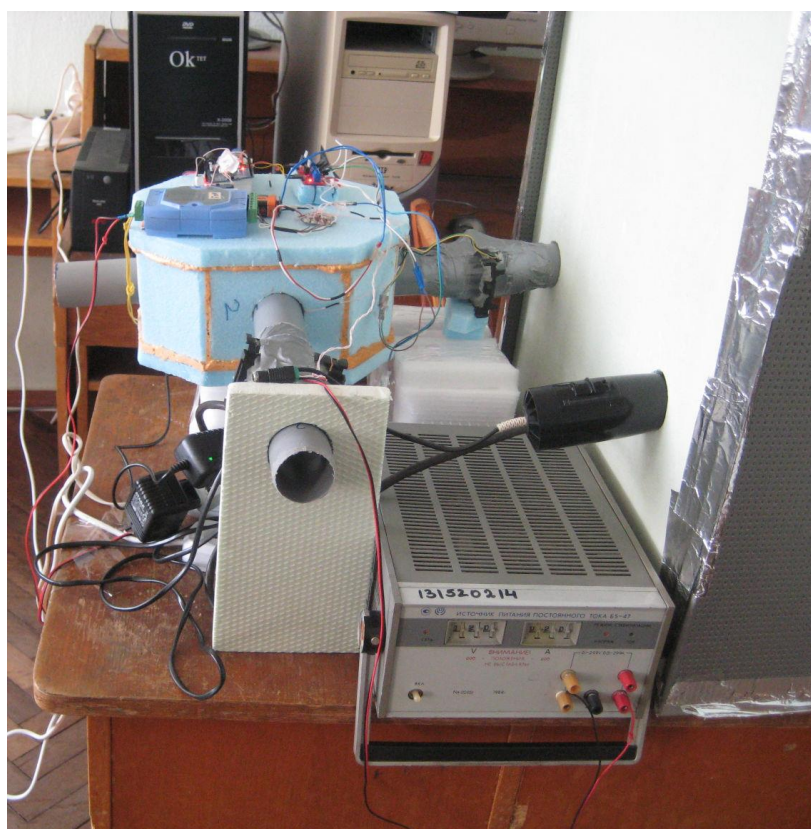


Рисунок 3.3.3 - Загальний вигляд лабораторного стенда

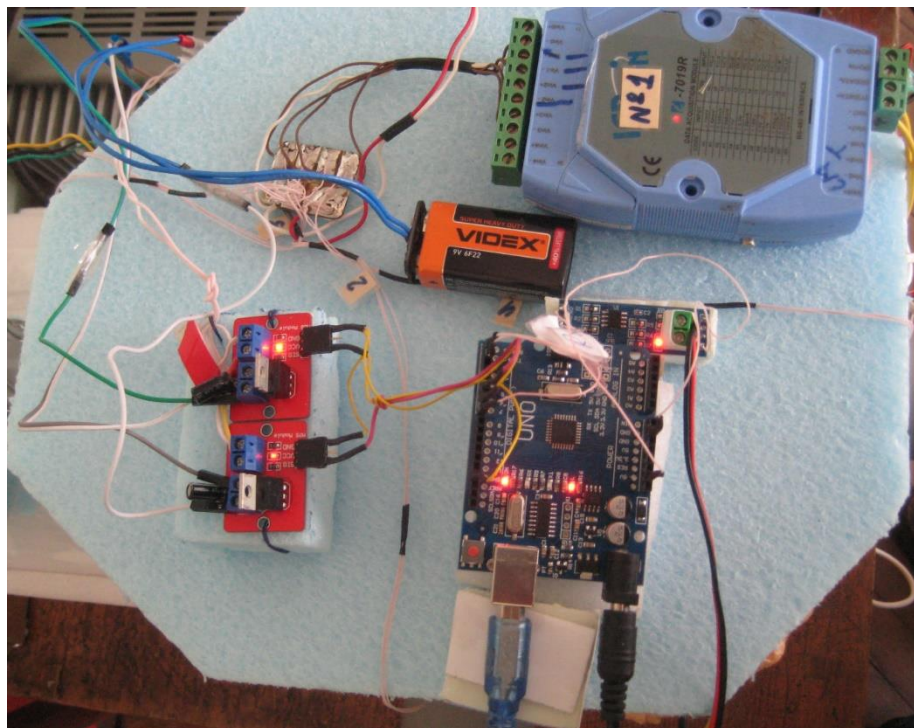


Рисунок 3.3.4 – Плата Arduino Uno, модуль АЦП I-7019, транзисторні ключи та батарейка 9 В для живлення напівпровідникових термометрів

На персональний комп'ютер було встановлено розроблену нами програму Temperature, за допомогою якої ми керували стендом, вимірювали і розраховували вхідні та вихідні температури гарячого та холодного повітря на входах і виходах пластинчатого теплообмінника у різних режимах його роботи.

3.3 Програмне забезпечення

Програмне забезпечення лабораторного стенду складається з програми для контролера Arduino та програми для персонального комп'ютера, яка задає режими роботи стенда, отримує значення температури гарячого та холодного повітря, зберігає отримані дані у файлах та будує відповідні графіки.

Програма (прошивка) для контролера Arduino Uno – файл DAC2.ino, призначена для роботи контролера з аналоговими термометрами LM35DZ та керування двигунами вентиляторів за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Напівпровідникові термометри використовують внутрішні 10-бітні АЦП контролера – у тому випадку, коли не використовується модуль 16-бітного АЦП I-7019. Також програма керує двома двигунами постійного струму, які підімкнених до двох потужних ключів на транзисторах IRF520, приєднаних до виходів контролера Arduino, які генерують сигнал з широтно-імпульсною модуляцією. Плата зв'язана з персональним комп'ютером за допомогою послідовних каналів зв'язку. При налаштуванні контролера використовується порт USB – від нього плата отримує живлення, а за допомогою віртуального послідовного порта, який утворює драйвер плати Arduino, відбувається зв'язок між комп'ютером та контролером. При роботі від автономного джерела живлення 12 В використовується послідовний порт UART контролера, який через перетворювачі UART у RS-485 та RS-485 у USB приєднується до комп'ютера. Канал зв'язку RS-485 працює у напівдуплексному режимі, швидкість обміну 9600 Бод, що достатньо для нормальної роботи програмного забезпечення. Розроблений нами протокол обміну дозволяє отримувати дані з датчиків температури, керувати виходами ШІМ а також додатковими цифровими виходами, які в майбутньому можна буде використати для роботи з іншими зовнішніми пристроями. Прошивка була розроблена за допомогою пакету програмування контролерів Arduino фірми Arduino.cc.

Програма для комп'ютера, що працює зі стендом теплообмінника, називається Temperature і взаємодіє зі стендом за допомогою послідовного інтерфейсу RS-485. Ця програма розроблена за допомогою пакету програмування Borland C++ Builder 6.0 і працює 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. При запуску програми на екрані з'являється головне вікно програми.



Рисунок 3.3.1 - Головне вікно програми Temperature

Кнопка <File> викликає діалог вибору файлу для запису результатів вимірювання, також назву файлу для запису можна ввести у відповідний рядок вікна вручну. Файл, у якому зберігаються результати роботи програми – текстовий, у кожному рядку якого 10 чисельних значень, відділених один від одного комами. Перше значення – номер виміру, далі час від початку вимірювань у мілісекундах, далі 4 значення напруги, зчитаних безпосередньо з датчиків, потім 4 значення температури, які відповідають отриманій нарузі. Такий формат запису даних дозволяє зберегти всі дані, що отримані зі стенду, а також обробляти їх у сторонніх програмах, наприклад Excel або Origin. Кнопка <Measuring T=f(t)> - запускає цикл вимірювання, при цьому опитуються всі датчики, записується вихідний файл і в режимі реального часу будуються графіки залежностей температури від часу. Кнопка <Fans> - керування та налаштування роботи вентиляторів, <Exit> - вихід з програми. Значення T1 –температура на вході холодного потоку повітря у теплообміннику, T2 – на виході холодного потоку, T3 – на вході гарячого потоку, T4 – на виході гарячого потоку. Кнопка зі

збільшувальним склом дає можливість більш детально роздивитися отримані графіки у окремому вікні. Кнопка зі знаком дискети дозволяє створити графічний файл з зображенням графіків. Підтримуються два піксельні формати – bmp та jpg і 2 векторні формати - wmf та emf графічних файлів. Кнопка зі знаком <відкрити> дає можливість завантажити текстовий файл попередніх вимірювань і подивитись його графіки. Кнопка <?> викликає на екран коротку довідку, а з ластіком – стирає виведені на екран графіки і починає побудову графіків з нуля.

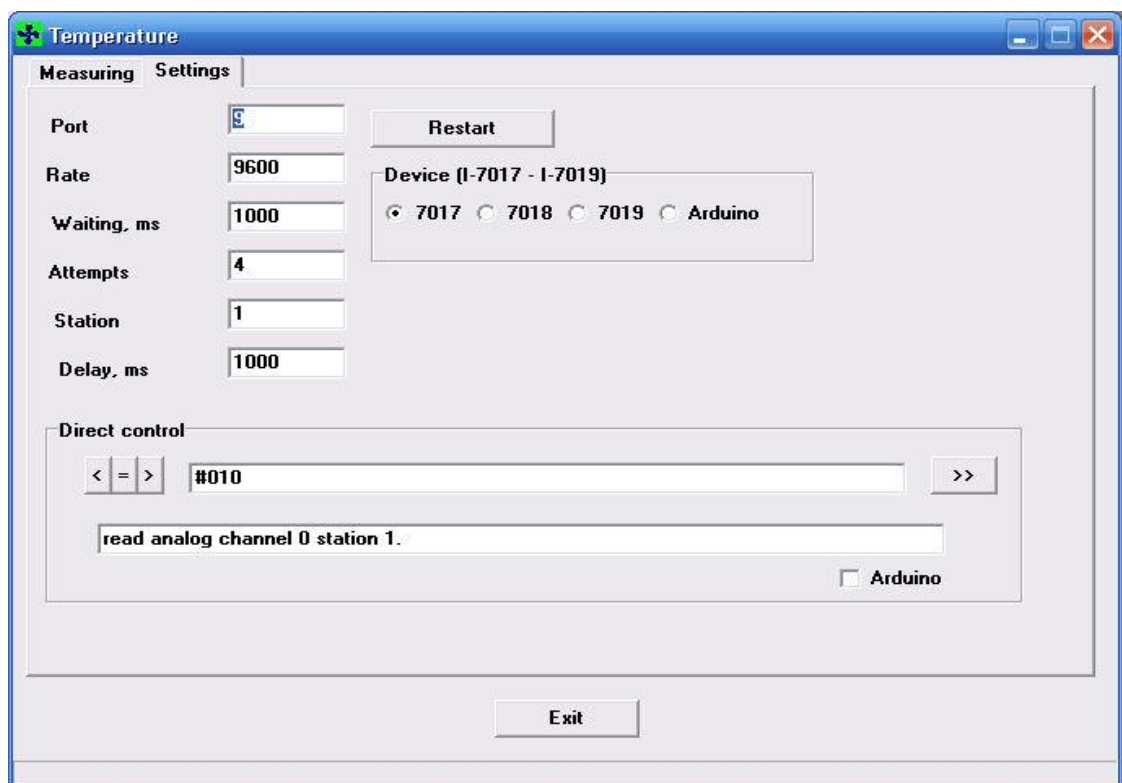


Рисунок 3.3.2 - Налаштування програми Temperature

Вкладка Settings дає доступ до налаштування параметрів програми. У ній задається номер послідовного порту, швидкість обміну, максимальний час очікування відповіді модуля, максимальна кількість спроб зв'язатися з модулем, номер станції для модуля ICP-CON, затримка у циклі опитування датчиків. Затримка опитування задається у мілісекундах і обумовлює швидкість роботи програми – темп опитування датчиків температури. Кнопка <Restart> - перезапускає послідовний канал зв'язку після зміни параметрів і дозволяє

перевірити доступність порту та коректність заданих параметрів. Група радіокнопок дозволяє вибрати тип вимірювального модуля. Прилади I-7017 та I-7018 –модулі 16 бітних 8-канальних АЦП сімейства ICP-CON, подібні I-7019. Вони мають трохи менші можливості, порівняно з I-7019, але сумісні з програмою. Кнопка Arduino переключає вимірювання на внутрішнє 10-бітне АЦП контролера Arduino. У цьому випадку зменшується точність вимірювання, але зникає необхідність використовувати дорогий модуль ICP-CON. У розділі <пряме керування> надається можливість безпосередньої роботи з каналом зв'язку. У верхній рядок вводиться запит у текстовому вигляді, натискається кнопка >> і запит надсилається у прилад. Перемикач Arduino переключає порти, коли використовуються два канали зв'язку. Кнопки керування перед рядком запиту дозволяють використовувати допоміжний файл Com.ini, у якому зберігаються вже сформовані запити і коментарі до них. Коментарі виводяться у нижньому рядку. У цей рядок також виводяться результати запиту.

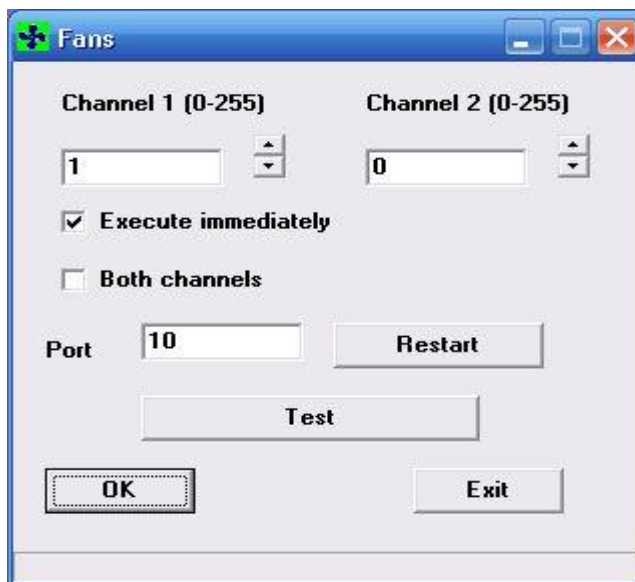


Рисунок 3.3.3 - Вікно для налаштування та керування роботою вентиляторів

У вікні для налаштування режимів роботи вентиляторів зібрані параметри керування роботи двигунами вентиляторів, які регулюють потоки повітря у

теплообміннику. Умовні значення у межах 0-255 для каналів керування – скважність широтно імпульсної модуляції, яку задає контролер Arduino. Значення 0 – канал вимкнено, 255 – максимальна потужність. Слід пам’ятати, що залежність реальної швидкості потоку від умовних чисел ШІМ нелінійна, що показано на рисунку 3.3.4 Значення ШІМ можуть змінюватись за допомогою кнопок зі стрілками або вручну. Додаткові опції – виконання запиту до контролера безпосередньо після зміни значення і штучне підтримання однакових значень для обох каналів. Номер послідовного порту може збігатися з номером порту у попередньому вікні або бути іншим, в залежності від того, використовується 1 або 2 канали зв’язку. Кнопка <Restart> перезапускає канал зв’язку. Кнопка <Test> - використовується для оцінки швидкості потоків повітря, вона запускає та зупиняє роботу вентиляторів і відраховує час між цими подіями. До каналів, по яким рухається повітря, приєднується ємність заданого об’єму і оцінюється час її заповнення. Кнопка <OK> - прийняти нові налаштування, <Exit> - повернутися до попередніх налаштувань.

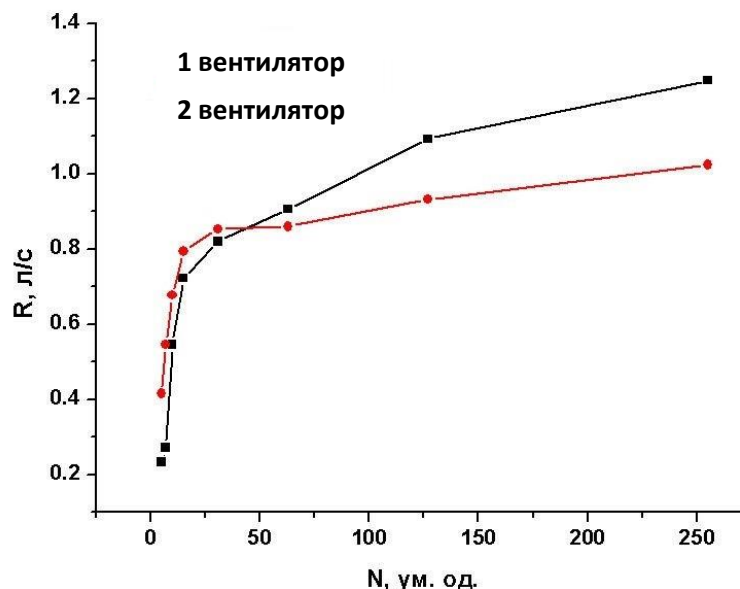


Рисунок 3.3.4 - Залежність швидкості потоків від умовного числа ШІМ для обох каналів

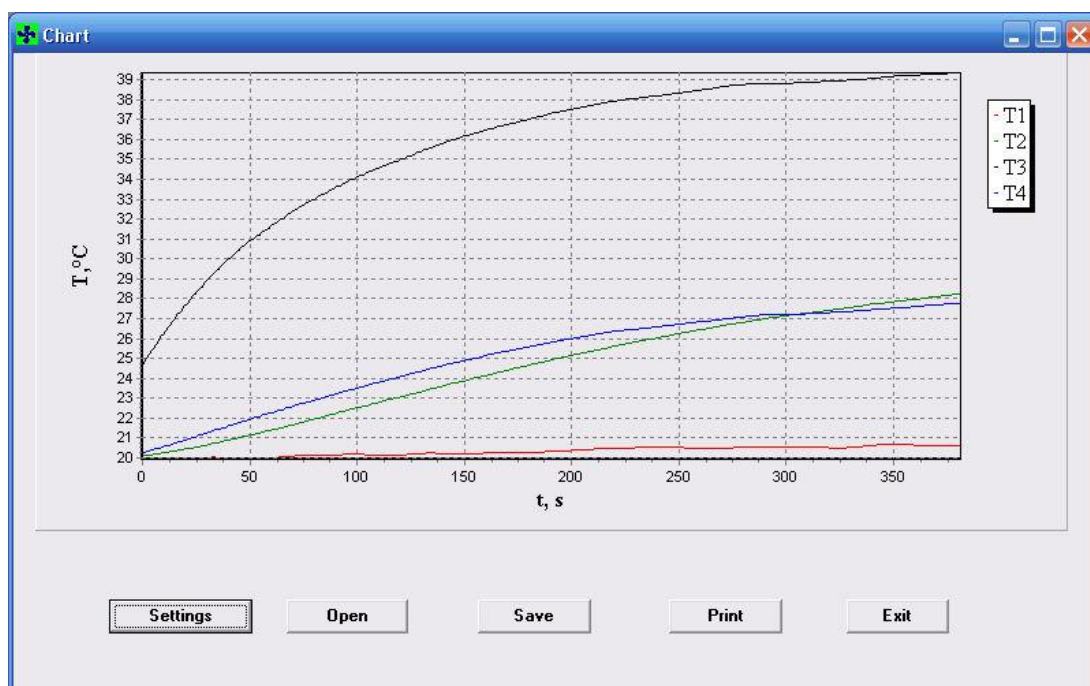


Рисунок 3.3.5 - Вікно для роботи з графіками

У вікні для роботи з графіками отримані залежності можна роздивитися у більшому масштабі і зберегти графічні зображення, які можна використовувати далі без залучення спеціальних програм побудови графіків. Кнопка <Settings> - відкриває вікно налаштування графіків, <Open> - завантажує графіки з текстового файлу, <Save> - зберігає зображення у графічному форматі, <Print> - викликає вікно налаштувань системного принтера і дозволяє надрукувати графіки, <Exit> - закриває вікно графіків.

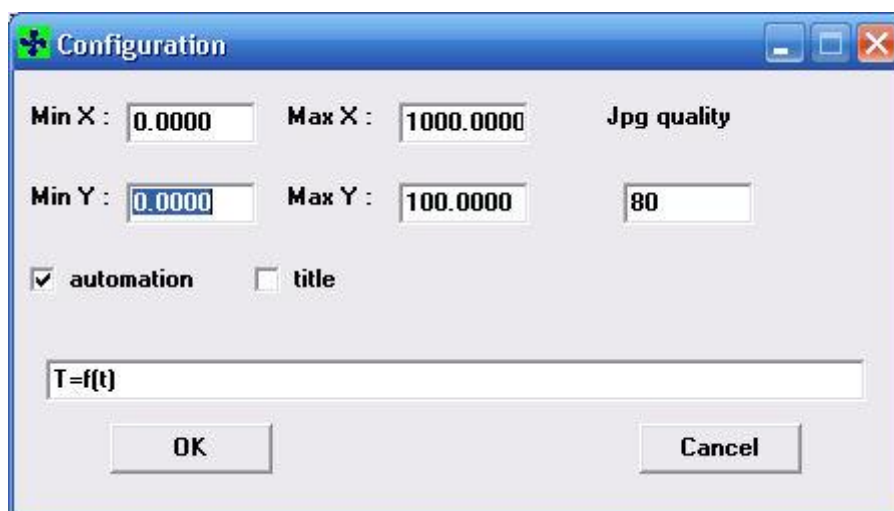


Рисунок 3.3.6 - Вікно для налаштування зовнішнього вигляду графіків

У вікні налаштувань зовнішнього виду графіків задаються межі значень по обох осях, або автоматичне завдання меж. Можна задавати наявність додаткового напису у верхній частині графіку. Сам напис вводиться у нижньому рядку. Якість зображень у форматі Jpg задається у процентах від 0 до 100, достатня для подальшого використання якості – від 80 відсотків. Кнопка <OK> - прийняти зміни, <Cancel> - повернутися до попередніх налаштувань.

Усі налаштування програми зберігаються у файлах Temperature.ini та Tt.ini. Обидва файли мають текстовий формат. У файлі Temperature.ini зберігаються параметри каналу зв'язку для ICP-CON і назва вихідного файлу (рядки 1 - 2), параметри ШІМ (рядок 3), параметри налаштування графіків (рядки 4 - 5).

Приклад файлу Temperature.ini

9,9600,4,1000,1,0,10

tt9_15_255_X.csv

10,1,0,0,1000,3,1,100

1,0,80,0.0000,1000.0000,0.0000,100.0000

T=f(t)

У файлі Tt.ini зібрані налаштування для роботи з датчиками температури. У першому рядку задаються канали модуля АЦП, до яких приєднано термометри T1,T2,T3,T4. У другому рядку додаткові множники для кожного каналу, які компенсують зміну коефіцієнтів підсилення для заданих каналів. Далі ідуть 4 рядки з параметрами лінійного перетворення, яке переводить напругу на датчику у температуру. Перше значення – кутовий коефіцієнт, друге доданок, який компенсує зсув нуля (актуально для датчиків типу L35Z).

Приклад файлу Tt.ini

0,1,2,3

1000.0,1000.0,1000.0,1000.0

0.1,0.84

0.1,-0.16

0.1,0.98

0.1,0.36

У програмі передбачено демонстраційний режим, який показує можливості самої програми, без використання зв'язку зі стендом. У цьому режимі канали зв'язку не відкриваються і програма циклічно зчитує дані з файлу, у якому було збережено результати реальних вимірювань, зроблених раніше. Демонстраційний режим вмикається при наявності у папці програми файлу Demo.ini, у якому записано назву файлу з попередніми результатами.

Програма Temperature дозволяє як керувати режимами роботи теплообмінника і зберігати отримані дані, так і відображати їх у вигляді графіків, а також обробляти ці графіки і зберігати їх у вигляді стандартних графічних файлів для подальшого використання.

Ми використали застосунок TCalc, що був створений на кафедрі раніше, головною задачею якого був теоретичний розрахунок процесу теплообміну в пластинчатому теплообміннику. Він калькулює температуру холодного і гарячого теплоносія на виході з теплообмінника враховуючи вхідні температури та витрати теплоносіїв, що задані. В програмі вказуються геометричні розміри та теплофізичні параметри теплообмінника та теплоносіїв. Програма розраховує в циклі і в залежності від режиму, деяка вхідна величина змінюється. Всього є 5 режимів роботи. Режим 1: змінюється температура гарячого теплоносія. Режим 2: змінюється температура холодного теплоносія. Режим 3: змінюються витрати гарячого теплоносія. Режим 4: змінюються витрати холодного теплоносія. Режим 5: змінюються витрати гарячого та холодного теплоносіїв одночасно. Програма працює на основі алгоритму перевірного теплового розрахунку [53], який використовує метод послідовних наближень. В цьому методі ми спочатку вводим початкові наближенні значення, по яким проводяться розрахунки, і вже потім результати, які ми отримали порівнюються з початковими припущеннями. Розрахунок повторюється тоді, коли відносна різниця обчислених і заданих

даних більша певної похибки (рекомендована величина менше 5% [53]), інакше – розрахунок закінчується. У роботах [53,54] у вигляді таблиць було задано багато параметрів, які описують фізичні властивості теплоносіїв та конструкційних матеріалів теплообмінника. Ми перенесли ці таблиці в текстові файли. Програма шукає таблично задані дані і, коли потрібно, розраховує проміжні результати, використовуючи метод лінійної апроксимації. Перший рядок кожної таблиці - це масштабні множники, які будуть використовуватись для множення всіх наступних значень цього стовпчика таблиці, що спрощує збереження даних у таблиці. Ми дещо спростили програму при розробці. Потоки теплоносія у реальному теплообміннику направлені під прямим кутом один до одного, а щілини в теплообміннику різняться геометричними розмірами. В програмі використали реальні розміри, проте використовували алгоритм для протиточного теплообмінника, не враховуючи поправочні коефіцієнти. Також, у роботі [53] кількість теплоносіїв вказана у кг/с, а ми використовуємо літри/с, це зручніше при розрахунках з повітрям. Коли програма відкривається на екрані появляється вікно, показане на рисунку 1.

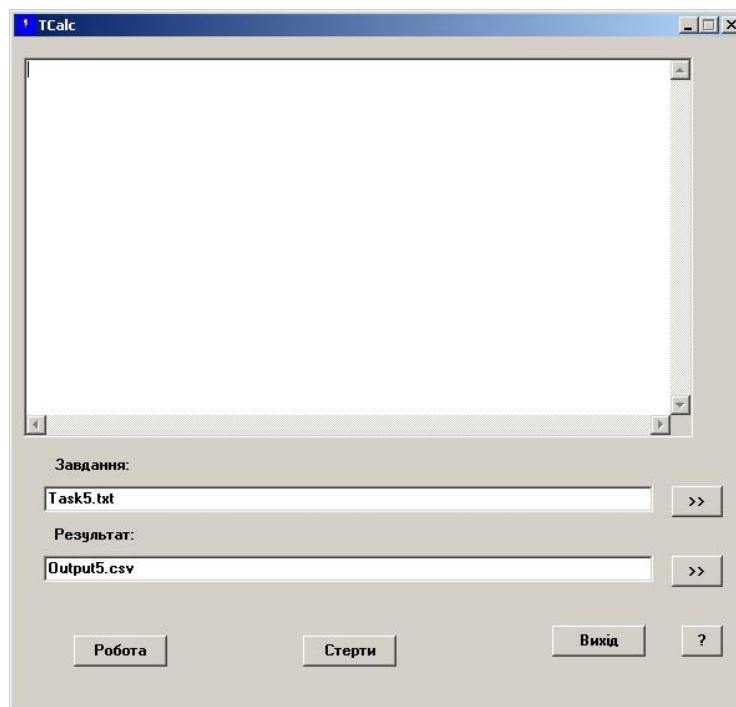


Рисунок 3.3.7 - Головне вікно програми TCalc.

Файл завдання і файл для запису обчислених значень можна задати у 2 слотах знизу головного вікна. Також їх можна знайти на файловій системі, використовуючи кнопки справа від слотів. Повідомлення від програми про помилки та допоміжна інформація від програми виводяться у слот по центру головного вікна. Цю інформацію можна стерти, натиснувши кнопку <Стерти>. Щоб розпочати розрахунок потрібно натиснути кнопку <Робота>. Розрахунок буде тривати до завершення завдання, до критичної помилки, чи до закінчення ітерацій. Після старту роботи, напис на кнопці зміниться на <Стоп>. Якщо її натиснути, то робота перерветься. Щоб вийти, натисніть кнопку <Вихід>. Щоб дізнатись інформацію про призначення та версію цієї програми, а також щоб побачити довідку, натисніть кнопку <?>. Програма керується за допомогою файлів завдання, де вказані геометричні розміри каналів теплообмінника, початкові температури носіїв, кількість каналів, максимальне число ітерацій алгоритму, витрати теплоносіїв, режим розрахунку, кількість кроків у циклі, крок зміни відповідної величини у циклі.

Файл TCalc.cfg містить налаштування програми. Перший рядок – ціле число, 1 – вмикається режим відладки, при якому логується вся допоміжна інформація у файлі Journal.txt, 0 – нічого не записується. В другому і третьому рядках вказуються останні назви файлів завдань та файлів для збереження результатів. Всі наступні рядки містять назви таблиць де можна знайти коефіцієнт K_0 для заданого числа Рейнольдса у перехідному режимі руху теплоносія [53], теплоємність матеріалу пластин теплообмінника та теплові параметри теплоносія, які залежать від температури (у нас повітря, параметри взяті з таблиці П2.1 у роботі [53]). Вихідний файл – це файл, де кожне значення відділене від іншого комою в одному рядку. Кожен рядок - це один крок циклу розрахунку. Використовуючи такий формат можна легко створювати графіки залежностей розрахованих даних використовуючи стандартні програми (Excel, Origin та інші). В рядках вихідного файлу є такі дані - номер рядка, витрати холодного теплоносія, витрати гарячого теплоносія, кінцева температура гарячого теплоносія, початкова температура гарячого теплоносія, початкова

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

Програма TCalc розраховує вихідні температури гарячого та холодного теплоносіїв, ефективність теплообмінного апарату при заданих початкових значеннях температури, безрозмірний коефіцієнт теплопередачі NTU, а також витрати теплоносіїв при відомих геометричних та теплофізичних параметрах теплообмінника. Також у вихідних файлах розраховується режим руху гарячого та холодного теплоносія – ламінарний, перехідний або турбулентний [53]. У 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 [53,54]. У різних розглянутих нами випадках змінюються початкові температури теплоносіїв та їх витрати. Гарячий та холодний теплоносії мають по 14 каналів для теплообміну. 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 [53]. 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 досягається за декілька ітерацій, розбіжність циклу свідчить про некоректне завдання початкових умов.

Спочатку було досліджено роботу теплообмінника при швидкостях потоку, що відповідають тим, які досліджувались експериментально. Розглянуто 3 випадки: перший - витрати гарячого повітря 1,023 л/с, холодного 1,248 л/с,

другий – 0,793 л/с та 1.248 л/с, третій - 1.023 л/с, та 0.722 л/с. Початкова температура гарячого повітря - 20,5 °С, холодного – 20,0 °С, у циклі змінюється температура гарячого повітря з кроком 0,5 °С, кількість кроків 100. На графіках показано залежність вихідної температури гарячого та холодного повітря від вхідної температури гарячого повітря, графік 1 – гаряче повітря, 2 – холодне. Також показано ефективність теплообмінника в залежності від вхідної температури гарячого повітря.

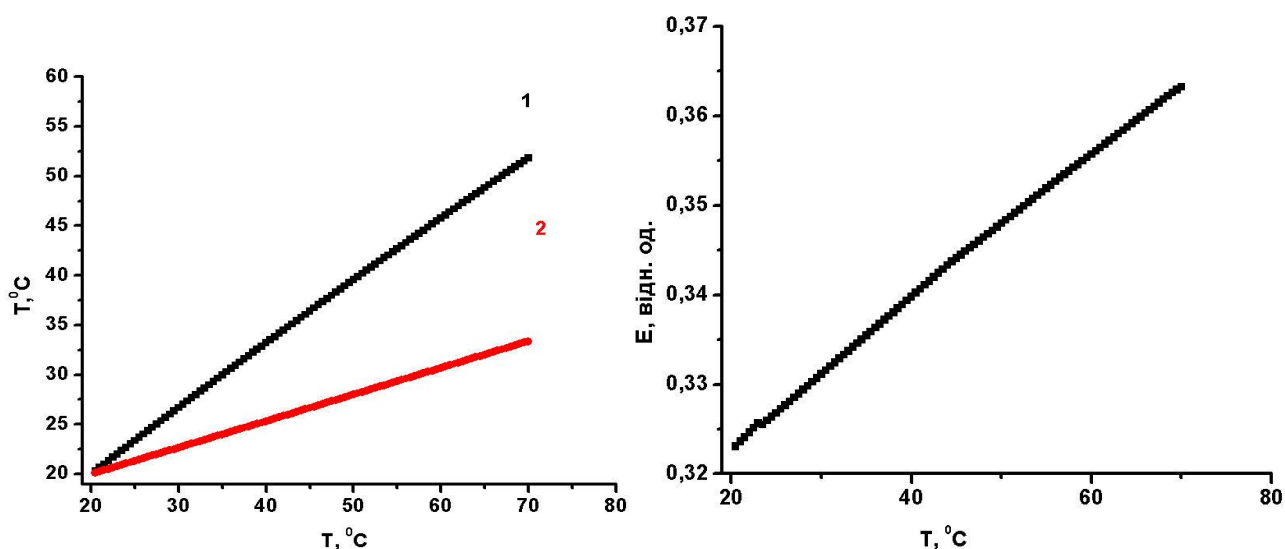


Рисунок. 3.3.8 - Графік витрат гарячого повітря 1,023 л/с, холодного 1,248 л/с.

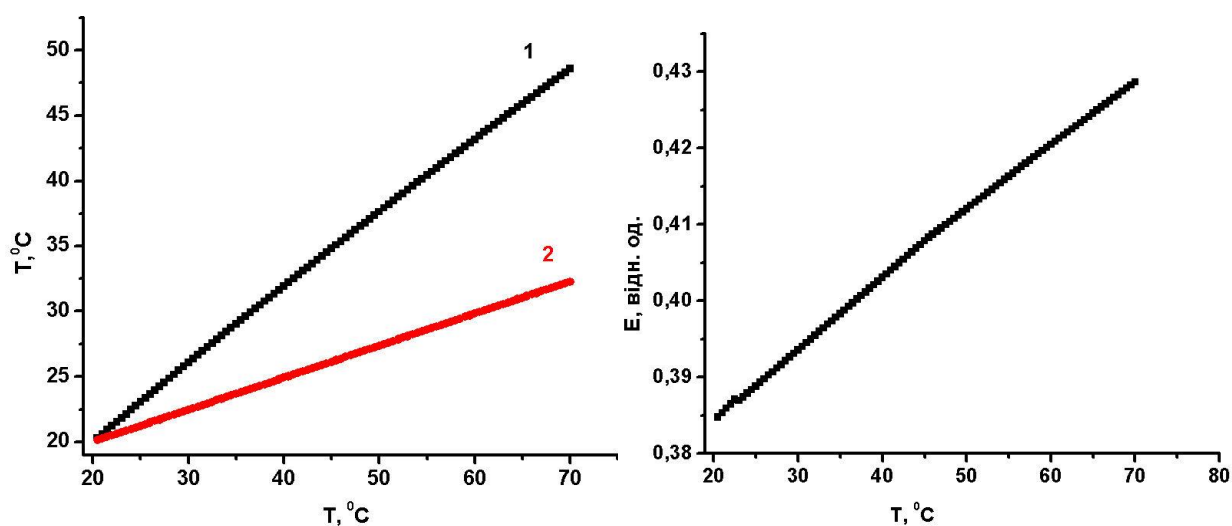


Рис. 3.3.9 - Графік витрат гарячого повітря 0,793 л/с, холодного 1,248 л/с

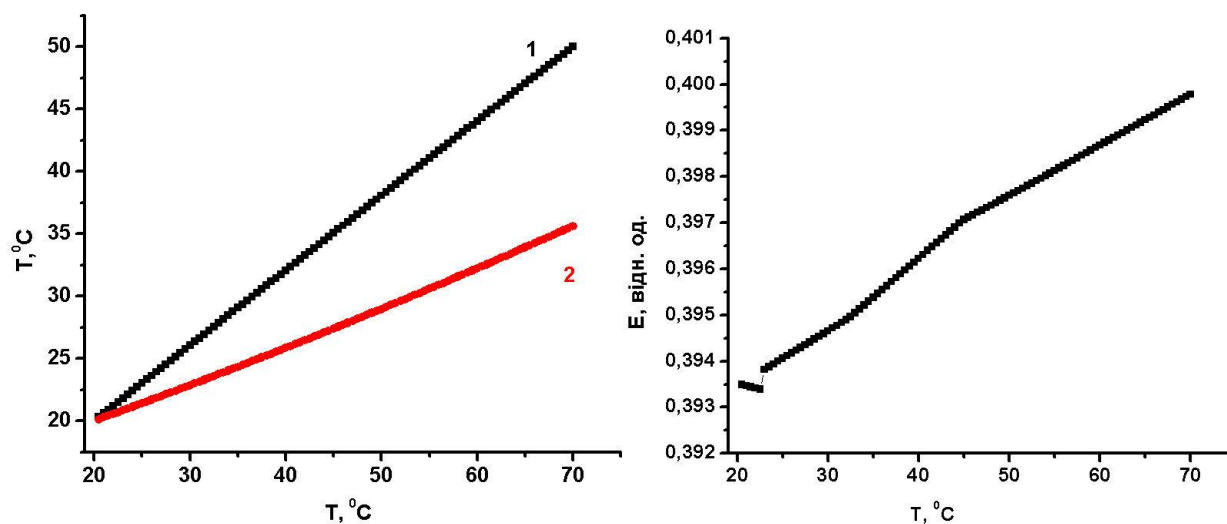


Рисунок 3.3.10 - Графік витрат гарячого повітря 1,023 л/с, холодного 0,722 л/с

Всі залежності на графіках близькі до лінійних. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний. Ефективність теплообмінника зростає при збільшенні температури гарячого повітря, також вона більша, коли хоч один з потоків має меншу швидкість. Ефективність розрахованого теплообмінника значно менша, ніж спостерігалось у експерименті, що можна пояснити приблизністю самої моделі і відмінністю табличних коефіцієнтів теплопровідності матеріалів від реальних, які було використано на практиці.

Далі нами було розглянуто випадок, коли витрати холодного повітря 1,248 л/с, 0,1 л/с, початкова температура гарячого повітря 50,0 °С, холодного – 20,0 °С. У циклі змінюється витрати гарячого повітря з кроком 0,1 л/с, кількість кроків 100.

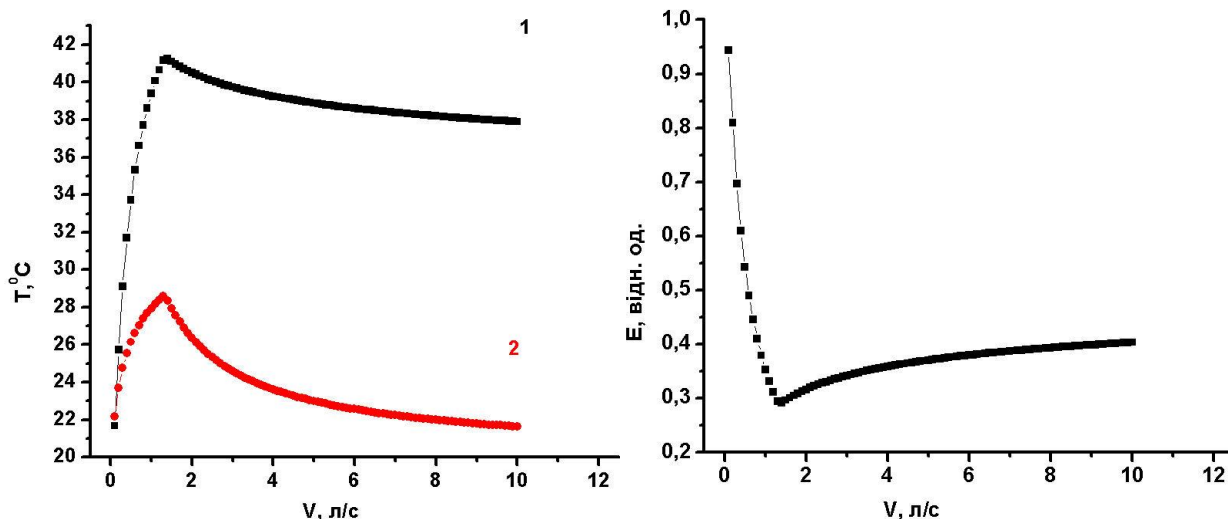


Рисунок 3.3.11 - Вихідна температура повітря та ефективність теплообмінника в залежності від витрати гарячого повітря

Вихідні температури гарячого та холодного теплоносіїв спочатку швидко зростають, після значення витрат приблизно 1,2 л/с починають повільно нелінійно спадати. Ефективність теплообмінника спадає при збільшенні витрат гарячого теплоносія до значень витрат приблизно 1,2 л/с, потім починає повільно зростати. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний.

У наступному досліді було зафіксовано втрати гарячого теплоносія, змінювалися втрати холодного. Початкова температура гарячого теплоносія 50,0 °С, холодного – 20,0 °С. Витрати гарячого теплоносія 1,023 л/с, холодного - 0,1 л/с. У циклі змінюється витрати холодного теплоносія з кроком 0,1 л/с, кількість кроків 100.

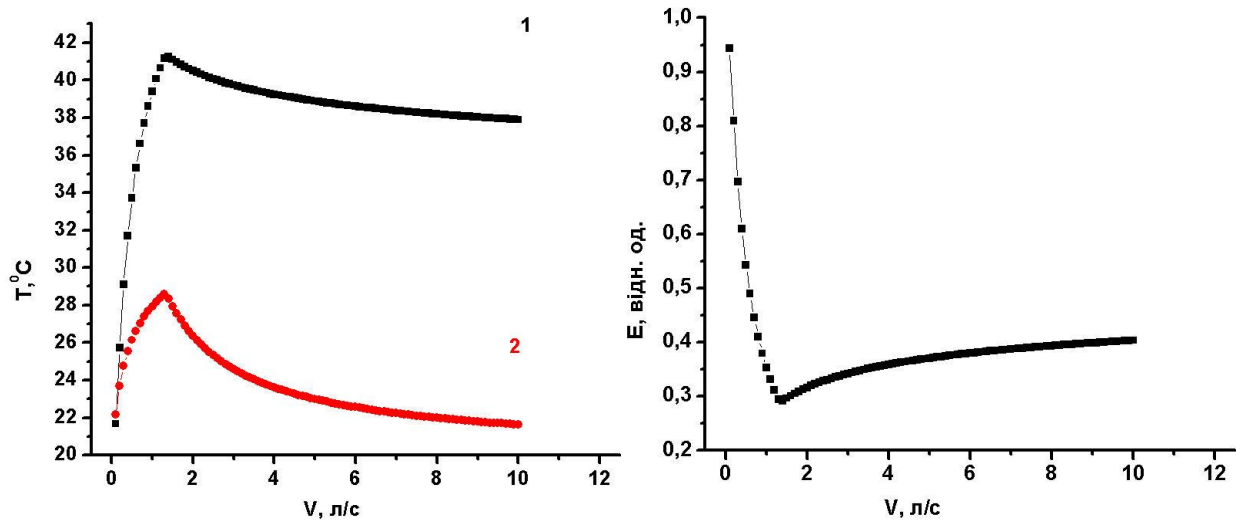


Рисунок 3.3.12 - Вихідна температура повітря та ефективність теплообмінника в залежності від витрати холодного повітря

Вихідні температури гарячого та холодного теплоносіїв подібні розглянутим у попередньому досліді, спочатку швидко зростають, після значення витрат приблизно 0,9 л/с починають повільно нелінійно спадати. Ефективність теплообмінника спадає при збільшенні витрат гарячого теплоносія до значень витрат приблизно 0,9 л/с, потім починає повільно зростати. Рух гарячого та холодного теплоносіїв у всіх випадках ламінарний

Потім нами було досліджено роботу теплообмінника при зміні витрат теплоносіїв у широких межах. Початкова температура гарячого теплоносія 50,0 °С, холодного – 20,0 °С. Витрати гарячого теплоносія 0,1 л/с, холодного - 0,1 л/с. У циклі змінюються витрати гарячого та холодного теплоносіїв одночасно з кроком 0,5 л/с, кількість кроків 1000.

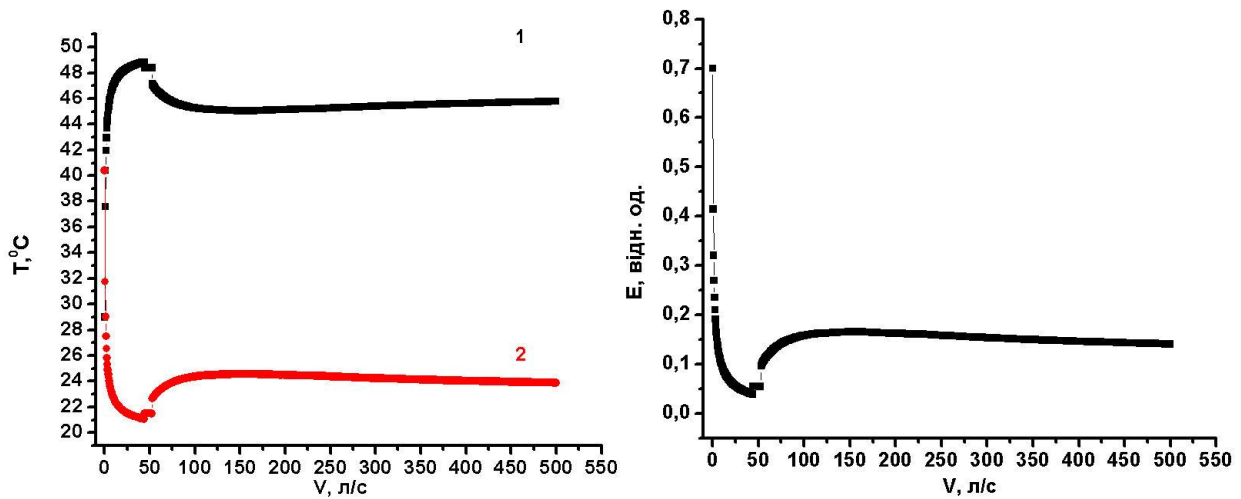


Рисунок 3.3.13 - Вихідна температура повітря та ефективність теплообмінника в залежності від одночасної зміни витрати холодного та гарячого повітря.

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 змінюється протилежним чином, 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 графіку 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 теплофізична модель має досить приблизний характер. Розраховані графіки дозволяють приблизно оцінити температури повітря на виході обох потоків у теплообміннику та його ефективність, обрати оптимальний режим роботи.

3.4 Модель рекуператора в програмному забезпеченні Comsol

Для моделювання експериментального рекуператора було використано програмне забезпечення Comsol Multiphysics.

За допомогою програмного пакету Comsol Multiphysics інженери і вчені моделюють конструкції, пристрої та процеси у всіх областях інженерних, виробничих і наукових досліджень.

Comsol Multiphysics - це інтегрована платформа для моделювання, що включає в себе всі його етапи: від створення геометрії, визначення механічних властивостей матеріалів і опису фізичних явищ, до налаштування рішення, що дозволяє отримувати точні і надійні результати.

Користувачі Comsol Multiphysics вільні від жорстких обмежень, які зазвичай властиві пакетам для моделювання, і можуть керувати усіма аспектами моделі. Можна творчо підходити до моделювання і вирішувати завдання, складні або неможливі при звичайному підході, поєднуючи довільне число фізичних явищ і задаючи, призначені для користувача, описи фізичних явищ, рівнянь і виразів через призначений для користувача інтерфейс (UI) [55].

Точні мультифізичні моделі враховують широкий діапазон робочих умов і великий набір фізичних явищ. Таким чином, моделювання допомагає розуміти, проектувати і оптимізувати процеси і пристрої з урахуванням реальних умов їх роботи.

Моделювання в Comsol Multiphysics дозволяє досліджувати в одному програмному середовищі явища електродинаміки і оптики, механіки конструкцій, акустики, гідродинаміки, теплопередачі, хімії та електрохімії, а також будь-які інші фізичні явища, які можна описати системами диференціальних рівнянь в частинних похідних. Ви можете поєднувати в одній моделі всі ці фізичні явища. Інтерфейс Comsol Desktop надає доступ до

повноцінного інтегрованого програмного середовища для моделювання. Як і в пристрої і процеси не вивчалися б, процес моделювання буде логічним і послідовним[55].

Побудова моделі в програмному середовищі Comsol складається з декількох частин: побудова геометрії моделі, додавання матеріалів та сітки, встановлення необхідних даних для розрахунку теплових характеристик рекуператора.

Побудова геометрії. Досліджувана модель(рис.3.4.1) складається з 28 листів алюмінію, товщиною 0,4 мм, розміром 175×175 мм. Між паралельними пластинами алюмінію знаходиться шар пінопласту шириною 25 мм та висотою 3 мм. Шар пінопласту допоміг утворити перехресні отвори для холодного та гарячого повітря(рис.3.4.2).

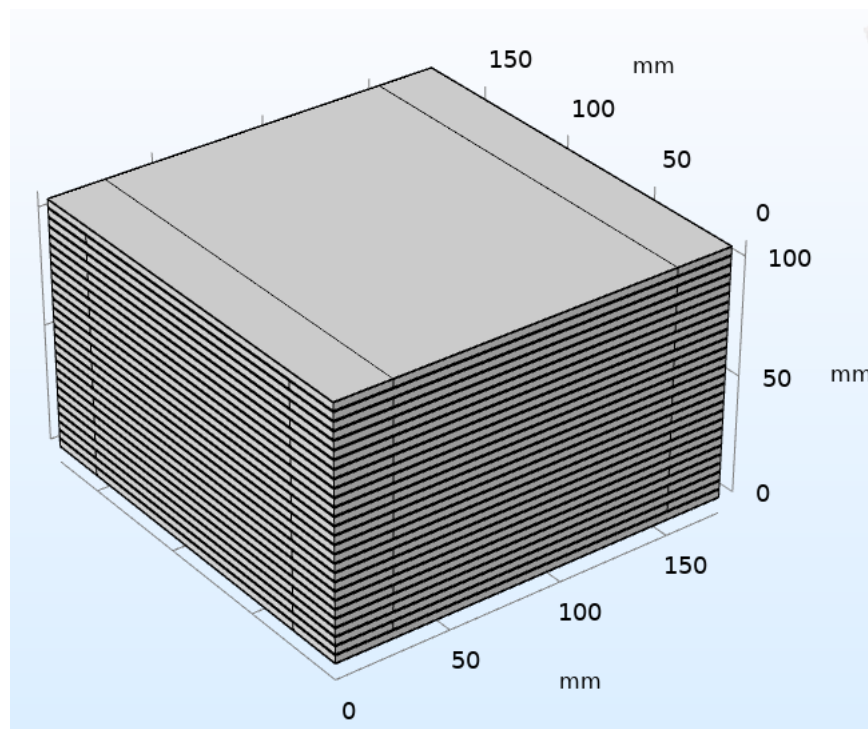


Рисунок 3.4.1 – Геометрична модель рекуператора

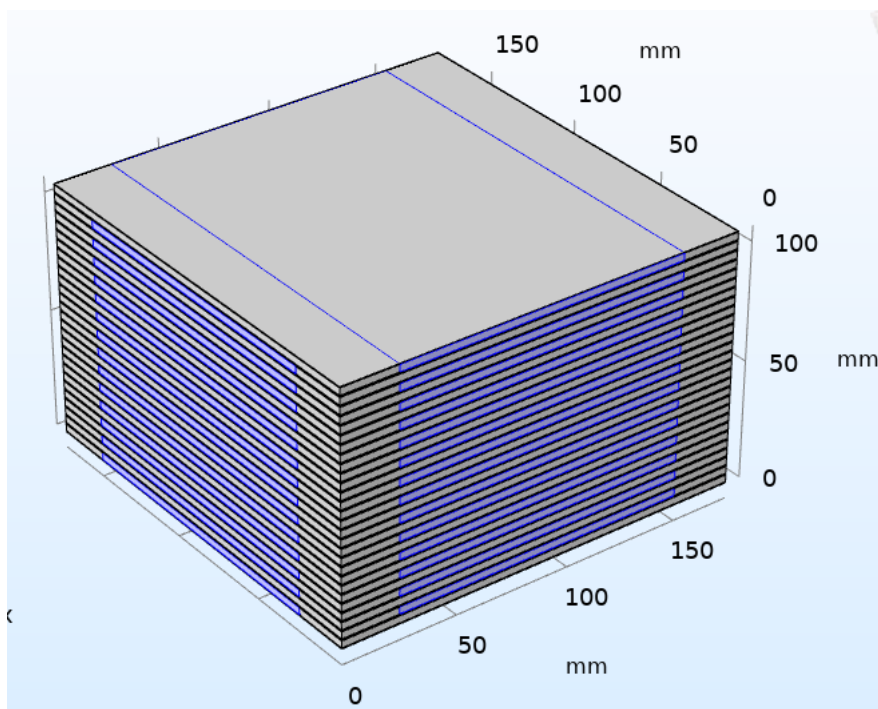


Рисунок 3.4.2 – Перехресні отвори для холодного та гарячого повітря

Властивості матеріалів, що використовуються в моделі, додавалися автоматично при їх завантаженні в модель. В даній моделі використовується алюміній – матеріал, за допомогою якого досліджуються температурні властивості рекуператора, повітря – речовина, що проходить крізь перехресні отвори та пінопласт – матеріал, який використовується для побудови перехресних отворів та який є теплоізолююваним.

Наступний крок – позначити в геометрії, що є твердою речовиною, отвори для проходження повітря, а саме: вхідні для гарячої, вхідні для холодної, вихідні для гарячої, вихідні для холодної; побудувати сітку(рис.3.4.3).

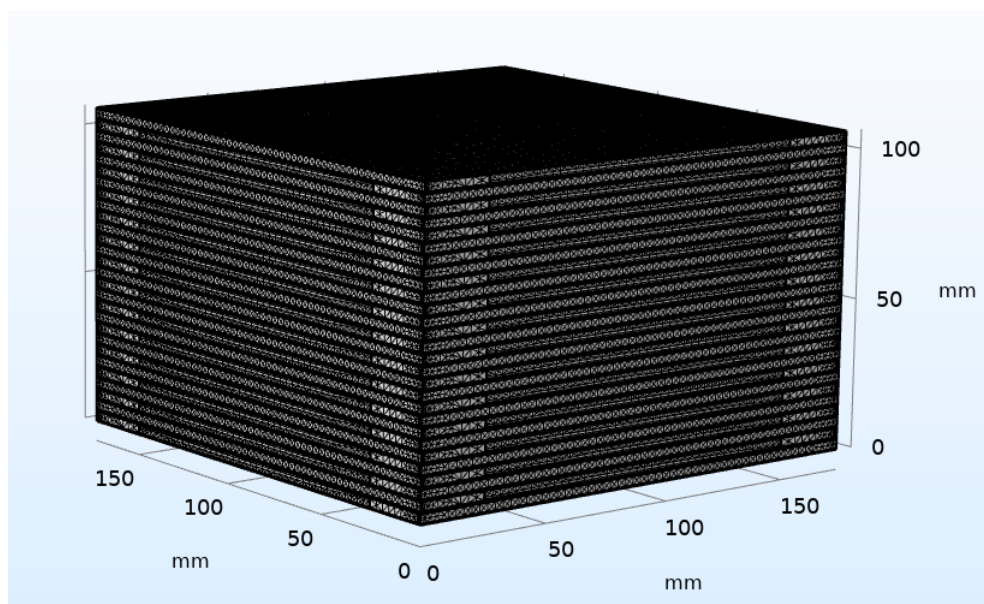


Рисунок 3.4.3 – Сітка геометрії

В результаті моделювання можна спостерігати розподіл температури, який залежить від вхідних параметрів – температури холодного та гарячого потоку, швидкості повітря.

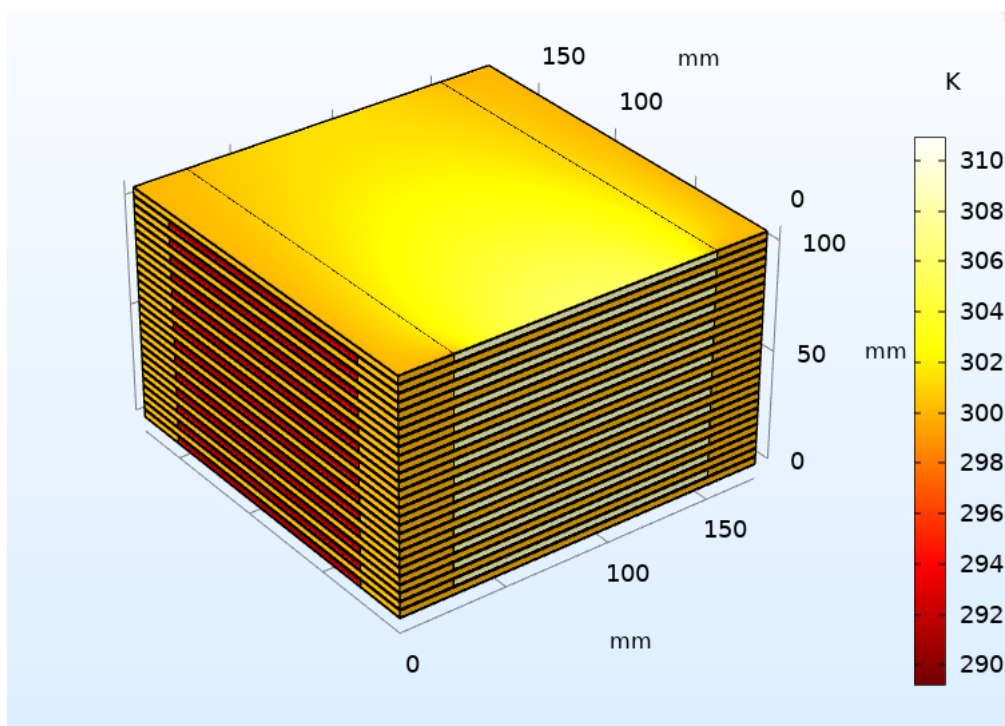


Рисунок 3.4.4 – Розподіл температури в досліджуваній моделі

Нижче представлено ряд графіків, які відображають розподіл температур в перерізах різних площин. Графіки побудовані не для всіх секцій моделі, а для частини моделі. Це зроблено з метою зменшення ресурсоемності задачі та скорочення часу розрахунку в 3-4 рази.

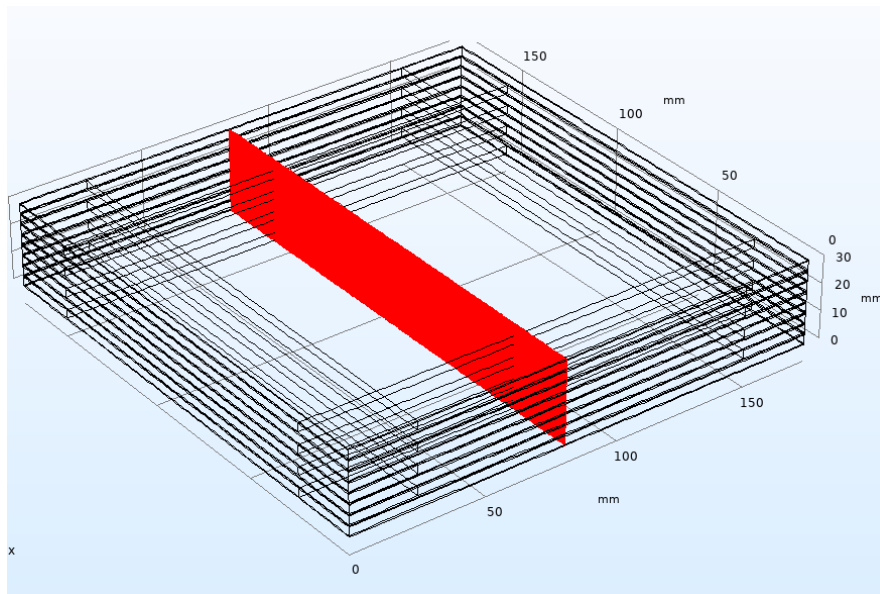


Рисунок 3.4.5 – Обрана yz-площина для отримання розподілу температур в ній

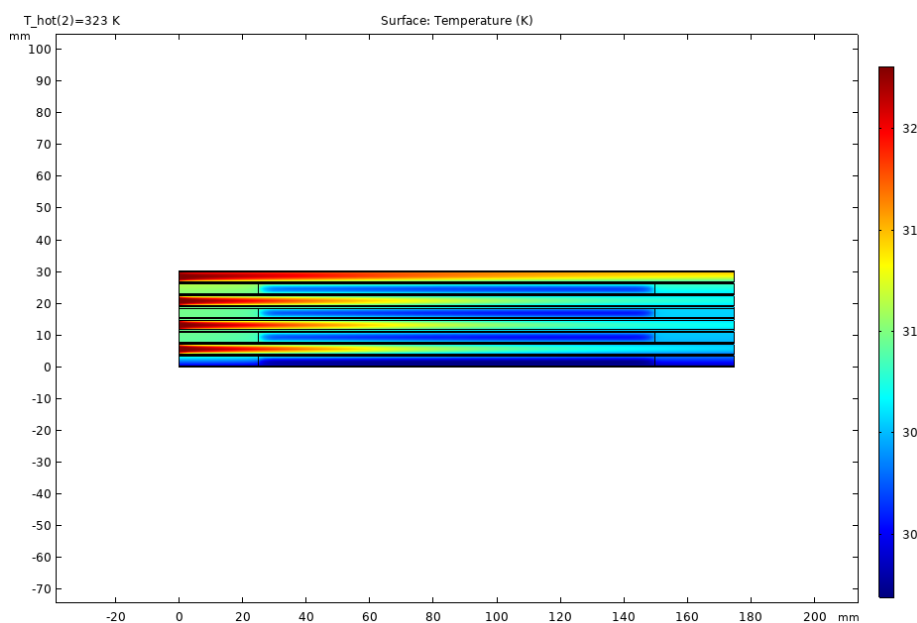


Рисунок 3.4.6 – Розподіл температури в yz-площині

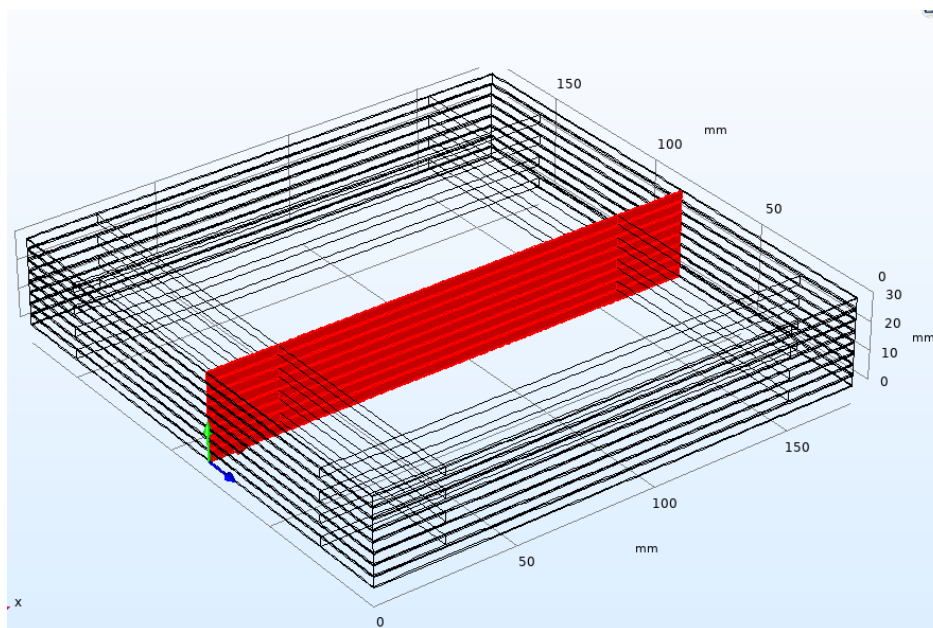


Рисунок 3.4.7 – Обрана xz-площина для отримання розподілу температур в ній

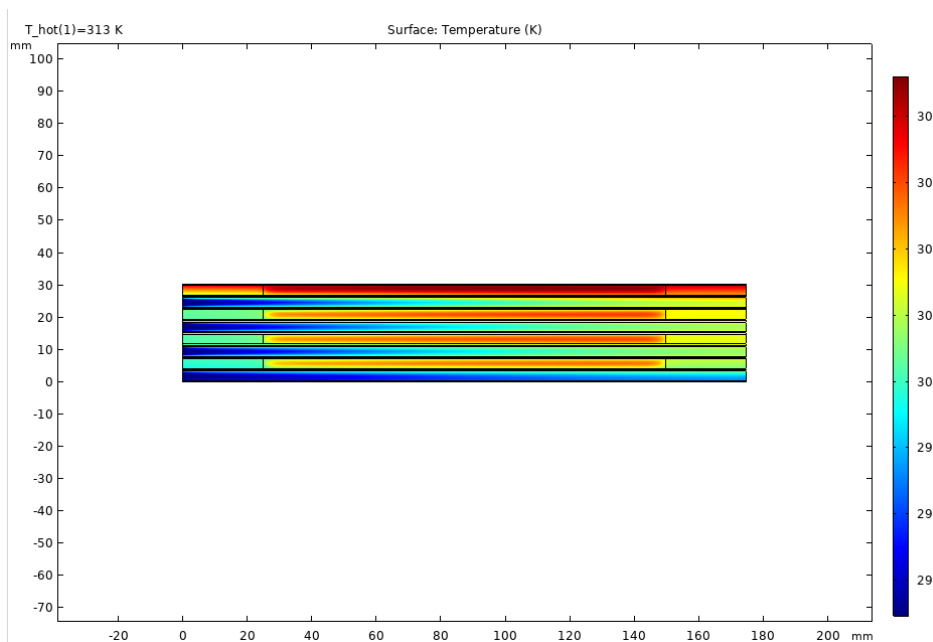


Рисунок 3.4.8 – Розподіл температури в xz-площині

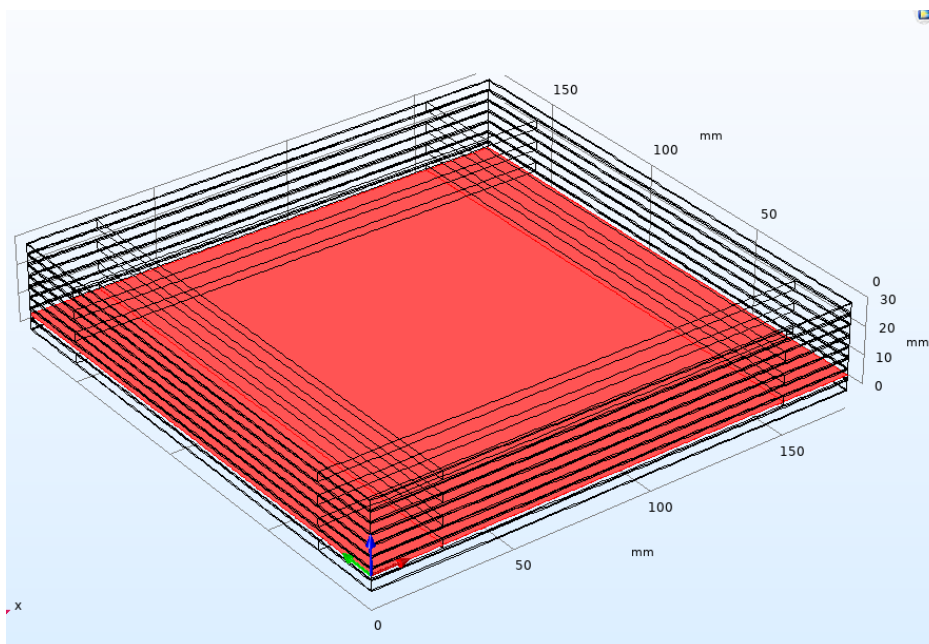


Рисунок 3.4.9 – Обрана ху-площина для отримання розподілу температур в ній

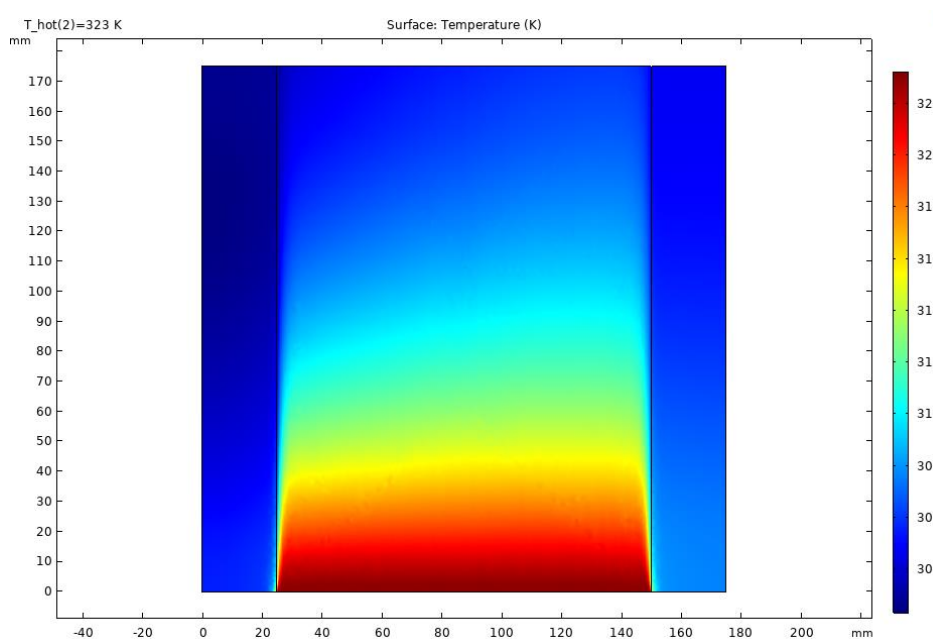


Рисунок 3.4.10 – Розподіл температури для гарячого потоку повітря в ху-площині

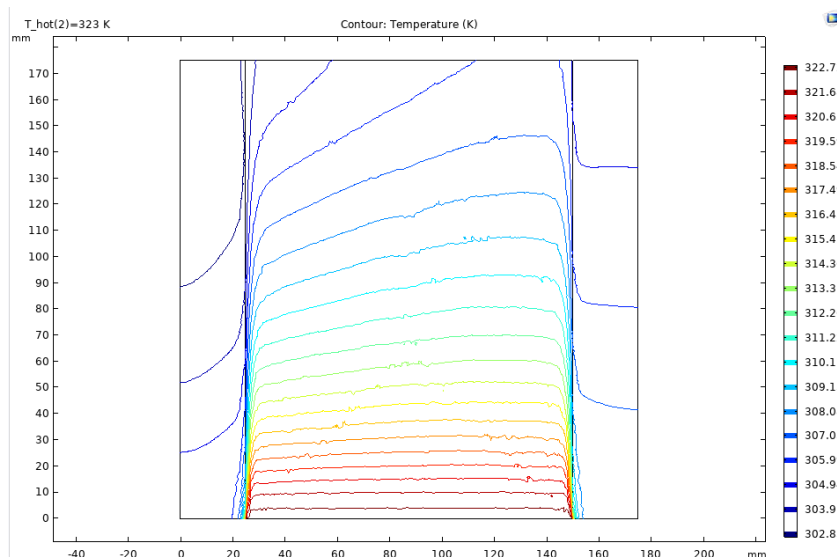


Рисунок 3.4.11 – Ізотермічний розподіл температури для гарячого потоку повітря в ху-площині

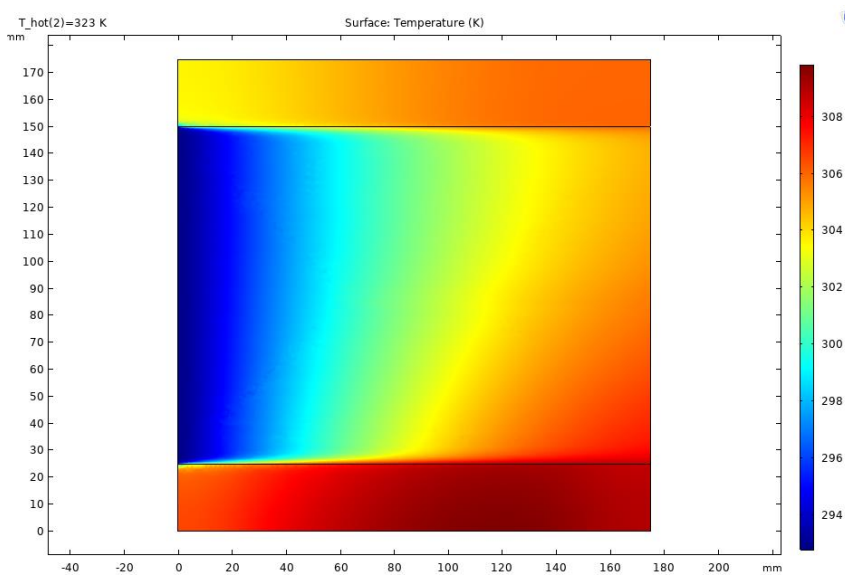


Рисунок 3.4.12 – Розподіл температури для холодного потоку повітря в ху-площині

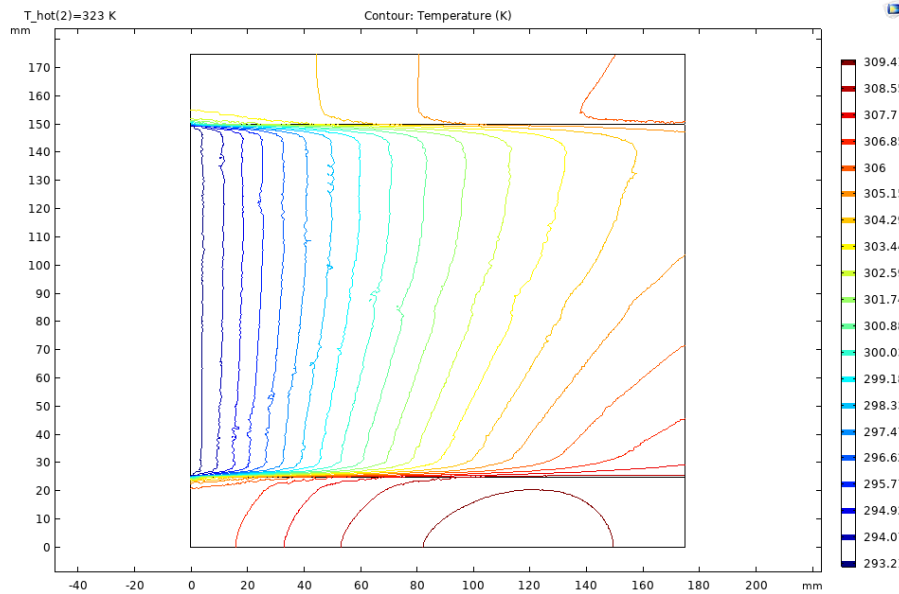


Рисунок 3.4.13 – Ізотермічний розподіл температури для холодного потоку повітря в ху-площині

За допомогою програмного забезпечення Comsol, було пораховано ефективність пластинчастого рекуператора. Побудовано графіки залежностей ефективності від вхідних температур та швидкості потоку повітря. Нижче представлено ці графіки.

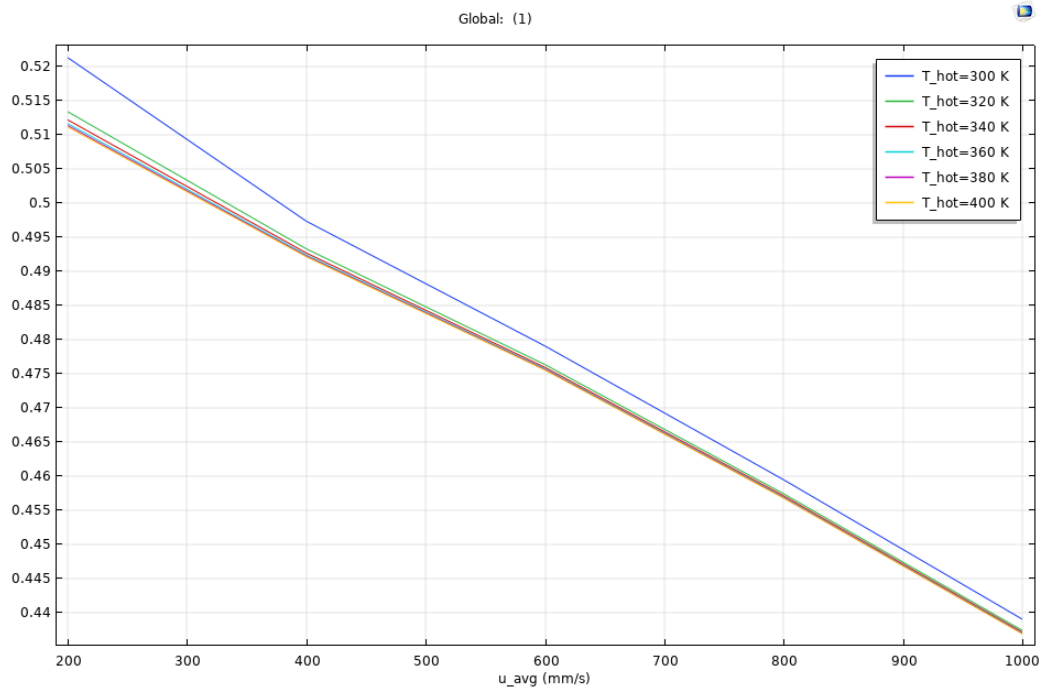


Рисунок 3.4.14 – Залежність ефективності теплообмінника від швидкостей повітря

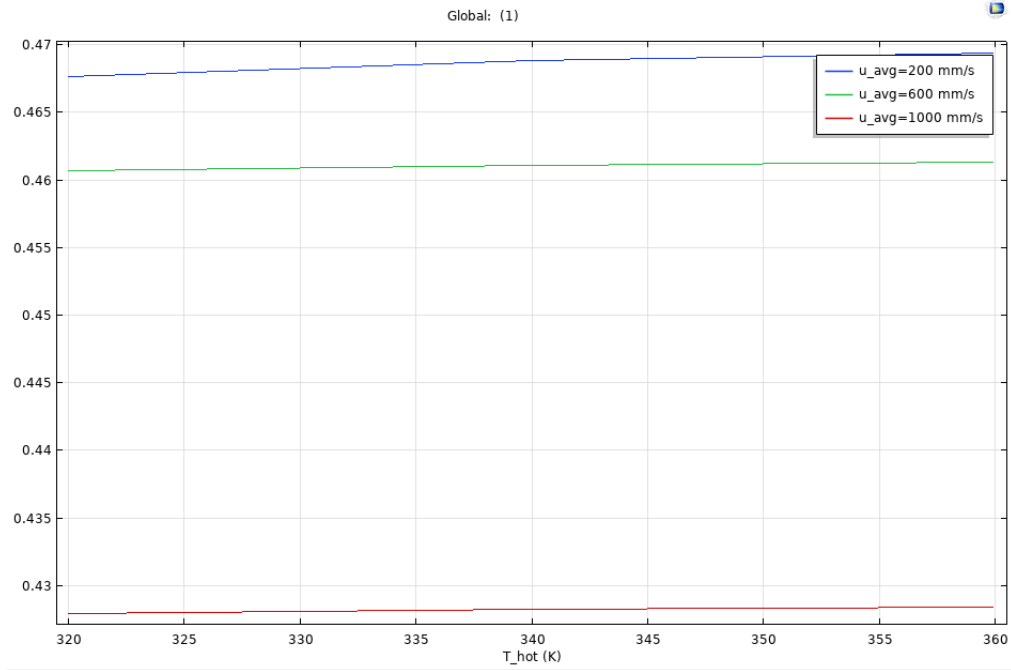


Рисунок 3.4.15 – Залежність ефективності теплообмінника від гарячої вхідної температури

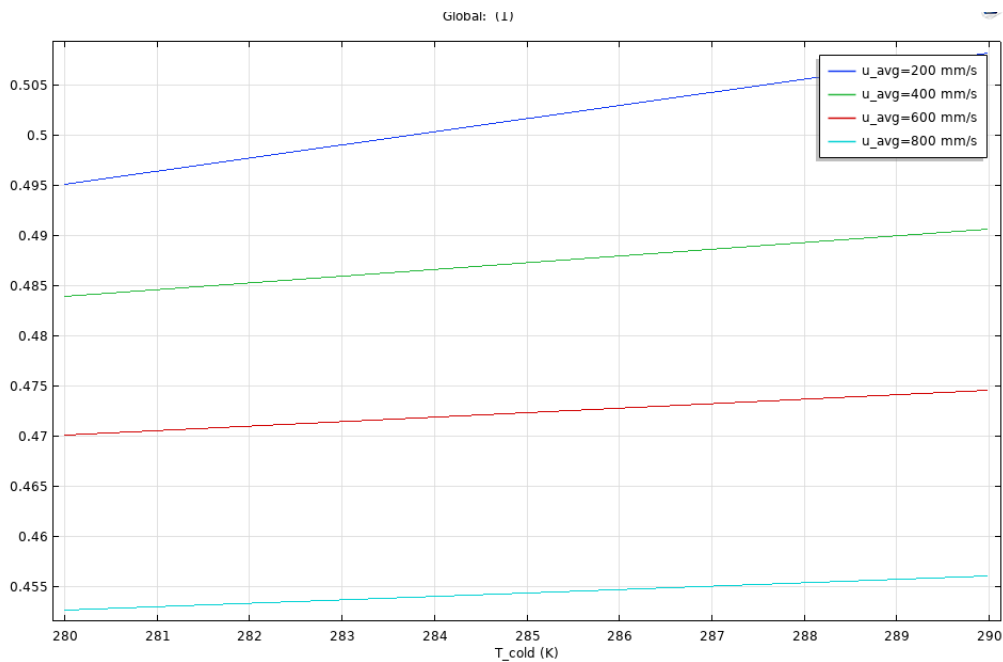


Рисунок 3.4.16 – Залежність ефективності теплообмінника від холодної вхідної температури

Можна зробити висновок, що ефективність теплообмінника суттєво знижується при збільшенні швидкості повітря, оскільки воно не встигає охолотитися(гарячий потік) чи нагрітися(холодний) при проходженні теплообмінника.

Таблиця 1 – Експериментальні вимірювання теплопровідності у теплообміннику

№ дослідю	T1,°C	T2,°C	T3,°C	T4,°C	Ефективність теплообмінника, Е
1	20,62	27,95	39,35	27,78	0,50
2	20,9	36,08	51,76	34,71	0,52
3	20,65	28,25	39,66	27,89	0,51
4	21,09	37,11	52,71	35,81	0,52
5	20,4	27,16	39,25	26,38	0,49
6	21,1	35,51	51,13	33,19	0,5

T1 - температура на вході потоку холодного повітря.

T2 - температура на виході потоку холодного повітря.

T3 - температура на вході потоку гарячого повітря.

T4 - температура на виході потоку гарячого повітря.

Якщо порівнювати ефективність теплообмінника пораховану для експериментальної моделі та комп'ютерної, то можна зазначити, що є невелика похибка в комп'ютерній моделі відносно експериментальної. Похибка могла виникнути через різні причини: різна температура навколишнього середовища; похибка термометра; залежність точки виміру на макеті від координати (точніше, як ця температура вимірюється) і так далі.

3.5 Лабораторна робота

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Мета роботи: визначення ефективності пластинчастого рекуперативного теплообмінника за допомогою комп'ютерного моделювання та експериментально. Побудова графіків ефективності теплообмінника від різних параметрів. Визначення оптимального ККД для різних конфігурацій рекуператора.

Загальні відомості

Теплопередача або теплообмін – це незворотній процес поширення теплоти в середовищі. Під процесом поширення теплоти розуміється обмін внутрішньою енергією між окремими елементами і між областями розглянутого середовища. Перенесення теплоти здійснюється трьома основними способами: теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

Теплопровідність – це передача тепла (теплової енергії) при безпосередньому зіткненні окремих частинок тіла або окремих тіл, що мають різні температури. Суть процесу полягає в тому, що дрібні частки тіла з більш високою температурою мають велику кінетичну енергію і при зіткненні з частинками з меншою температурою віддають свою енергію, а останні її сприймають. При цьому ніякого перенесення маси речовини не відбувається. У чистому вигляді теплопровідність може спостерігатися тільки у твердих тілах.

Конвекція – процес перенесення теплоти при переміщенні об'ємів рідини або газу (текучого середовища) в просторі з області з однією температурою в область з іншою температурою. При цьому перенесення теплоти нерозривно пов'язане з переносом самого середовища.

Теплове випромінювання – процес поширення теплоти за допомогою електромагнітних хвиль, обумовлений тільки температурою і оптичними властивостями випромінюючого тіла, при цьому внутрішня енергія тіла (середовища) переходить в енергію випромінювання. Процес перетворення внутрішньої енергії речовини в енергію випромінювання, перенесення випромінювання і його поглинання речовиною називається теплообміном випромінювання. У природі і техніці елементарні процеси поширення теплоти: теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання, – часто відбуваються спільно.

У чистому вигляді теплопровідність може спостерігатися тільки у твердих тілах.

Конвекційні процеси завжди супроводжується теплопровідністю. Спільний процес перенесення теплоти конвекцією і теплопровідністю називається конвективним теплообміном.

Теплообмінними апаратами називаються пристрої, призначені для передачі теплоти від одного середовища до іншого. За принципом дії теплообмінні апарати можуть бути розділені на рекуперативні, регенеративні і змішувальні.

Рекуперативні теплообмінні апарати – це пристрої, в яких дві рідини з різними температурами течуть в просторі, розділеному твердою стінкою. Теплообмін відбувається за рахунок конвекції і теплопровідності стінки, а якщо хоч одна з рідин є випромінюючим газом, то – і за рахунок теплового випромінювання.

Регенеративні теплообмінні апарати – це пристрої, в яких одна і та ж сама поверхня омивається то гарячою, то холодною рідиною. Спочатку поверхня регенератора відбирає тепло від гарячої рідини і нагрівається, потім поверхня регенератора віддає енергію холодній рідині. Таким чином, в регенераторах теплообмін завжди відбувається в нестационарних умовах, тоді як рекуперативні теплообмінні апарати працюють здебільшого в стаціонарному режимі.

У змішувальних теплообмінних апаратах теплопередача здійснюється при безпосередньому контакті і змішуванні гарячої та холодної рідин.

Однією з основних характеристик конструкції теплообмінного апарату є його тип відносно руху потоків теплоносія та схеми їх взаємного руху. У напрямку руху теплоносія слід розрізняти:

- прямоточний – рух теплоносіїв паралельний, напрям їх потоків співпадає;
- протиток – рух теплоносіїв паралельний, проте потоки направлені в протилежних напрямках;
- перехресний потік – це взаємно перпендикулярний напрямок потоків теплоносіїв.

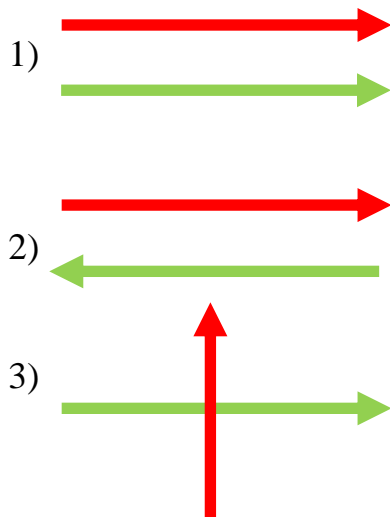


Рисунок 3.5.1 - Схеми руху теплоносіїв в теплообмінних апаратах.

1) прямоточний, 2) протиток, 3) перехресний потік.

Розрахунок теплообмінних апаратів, що працюють в стаціонарному режимі, ведеться на основі двох рівнянь: теплового балансу і теплопередачі. Рівняння теплового балансу означає рівність кількості тепла, що віддається гарячим теплоносієм (Q_{Γ}), сумі кількостей тепла, що отримав холодний теплоносієм (Q_x), і втрат в навколишнє середовище Q_{nc} :

$$Q_{\Gamma} = Q_x + Q_{nc} \quad (3.5.1)$$

Нехтуючи втратами тепла в навколишнє середовище, маємо $Q_{\Gamma} = Q_x = Q$, або

$$Q = G_{\Gamma} \cdot \bar{c}_{p\Gamma} \cdot \Delta T_{\Gamma} = G_x \cdot \bar{c}_{px} \cdot \Delta T_x, \quad (3.5.2)$$

Де G_g, G_x – відповідно масові витрати гарячого і холодного повітря, кг/с; $\bar{c}_{p_g}, \bar{c}_{p_x}$ – середні ізобарні питомі теплоємності гарячого та холодного повітря; ΔT_g і ΔT_x – зміна температур гарячого та холодного повітря.

Рівняння теплопередачі визначає кількість теплоти Q , що передається через задану поверхню площею F , якщо задані середні температури теплоносія, що охолоджується, і теплоносія, що нагрівається:

$$Q = K(\bar{T}_g - \bar{T}_x) F, \quad (3.5.3)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі від одного теплоносія до іншого, Вт/(м²·К).

$$\bar{T}_g = (T_g^{ex} + T_g^{in})/2; \bar{T}_x = (T_x^{ex} + T_x^{in})/2. \quad (3.5.4)$$

Коефіцієнт теплопередачі K характеризує інтенсивність передачі теплоти від одного середовища до іншого через розділяючу їх стінку. Він чисельно дорівнює кількості теплоти, що проходить через одиницю поверхні стінки в одиницю часу при різниці температур між середовищами в один градус.

Термодинамічна ефективність теплообмінника – це відношення кількості теплоти, переданої в даному теплообміннику, до кількості теплоти, переданої в теплообміннику з нескінченно великою поверхнею теплообміну з тими ж параметрами на вході. Ефективність теплообмінника визначається за формулою:

$$E = \frac{T_x^{вих} - T_x^{вх}}{T_g^{вх} - T_x^{вх}}. \quad (3.5.5)$$

Моделювання в середовищі Comsol

За допомогою вже готової конструкції рекуператора (рис.3.5.2) та зміни вхідних температур, швидкості потоку (рис.3.5.3) порахувати ефективність рекуператора.

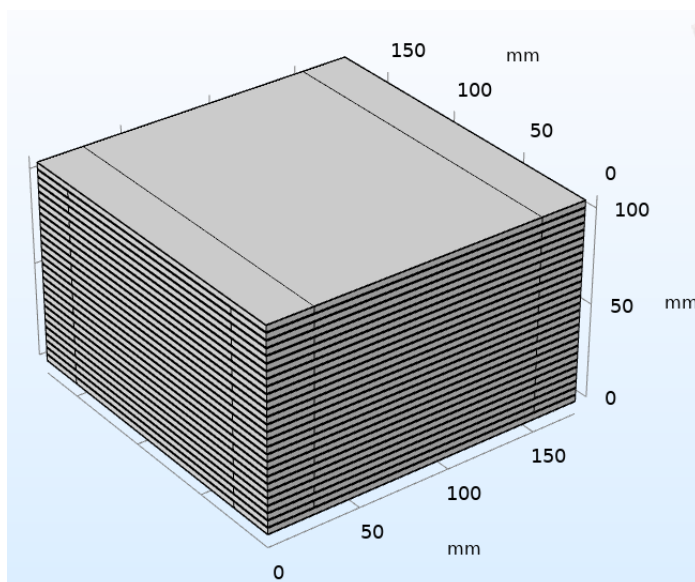


Рисунок 3.5.2 - Геометрична модель рекуператора

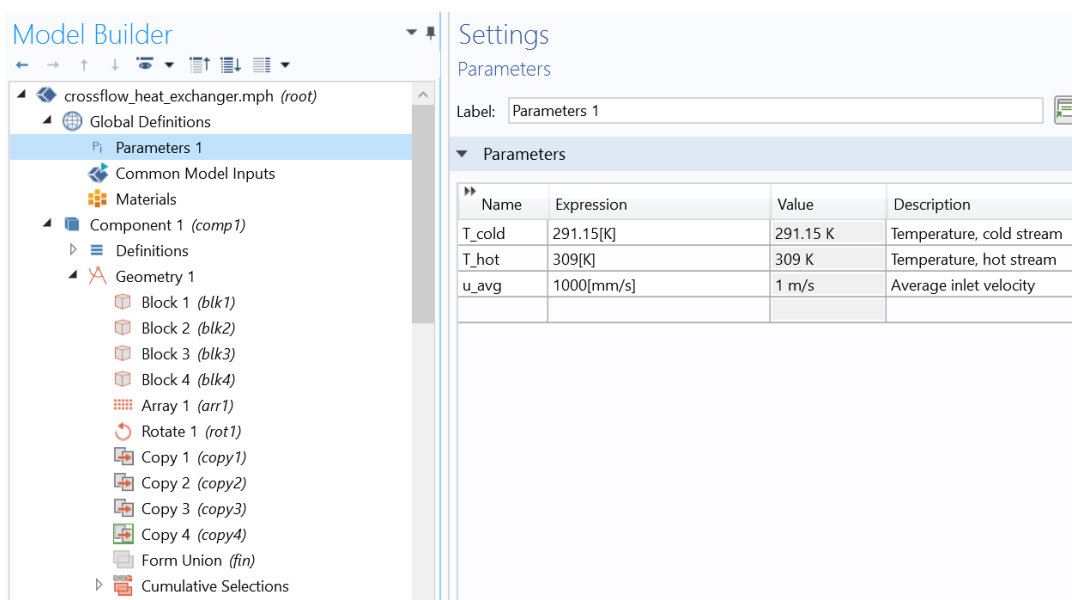


Рисунок 3.5.3 – Панель для зміни вхідних температур та швидкості потоку повітря

Формула розрахунку ефективності рекуператора вже додана в програмне забезпечення Comsol (рис.3.5.4). Побудувати графіки залежностей ефективності від змінених параметрів. Приклад побудови графіка також є в моделі, що використовується в цій лабораторній роботі.

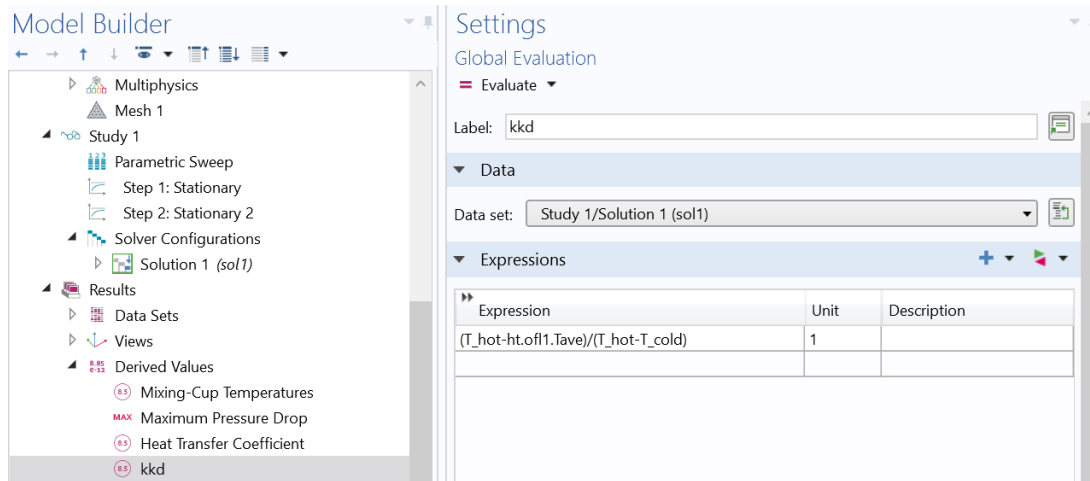


Рисунок 3.5.4 – Місце знаходження формули для рахування ККД рекуператора

Експериментальні вимірювання

Пластинчастий рекуператор з перехресним потоками складається з 28 пластинок розміром 175×132 мм та товщиною 0,4 мм, виготовлених з дюралюмінію. Пластинки розташовані паралельно одна над одною. Між пластинками по краях знаходяться смужки ДВП товщиною 3 мм та шириною 25мм. Смужки ДВП допомагають утворити перехресні отвори, у яких висота складає 3,2 мм, ширина – 12,5 мм.

Отвори між пластинами забезпечують потік повітря. На кожному вході в рекуператор та виходах з нього встановлено труби, які мають діаметр 50 мм; вхідні труби обладнані вентиляторами. В труби поміщено по одному датчику температури LM35DZ. В свою чергу, 8-канальний 16-бітний модуль АЦП ICP-CON I-7019 дає можливість проводити вимірювання вихідної напруги на датчиках (рис.3.5.5). Використовуємо перетворювач RS-485 у USB і приєднуємо до комп'ютера модуль. Після цього за допомогою програми вимірюються і розраховуються у різних режимах роботи рекуператора температури гарячого та холодного повітря на його входах і виходах.

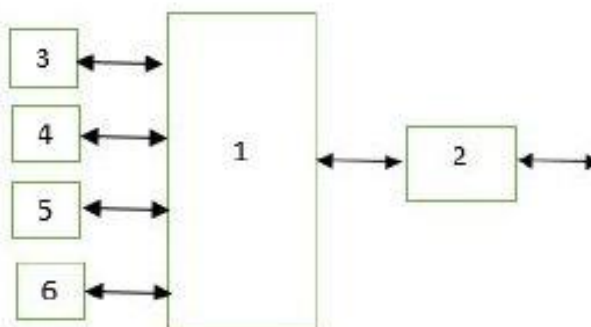


Рисунок 3.5.5 – Схема стенда для вимірювання температури.

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

Хід роботи

1. Розрахувати ефективність пластинчастого рекуперативного теплообмінника за допомогою програмного забезпечення Comsol, проаналізувати розподіл температур.

2. Знайти оптимальну ефективність пластинчастого рекуперативного теплообмінника для різних конфігурацій (різної швидкості потоку повітря, різних значень вхідної температури, різної ширини отворів).

3. Побудувати графіки залежностей ефективності від перелічених параметрів.

4. На експериментальній установці керувати швидкостями потоку повітря, виміряти температури на виході, порахувати ефективність рекуператора та побудувати графіки. Порівняти отримані результати з розрахунками в середовищі Comsol.

Контрольні запитання

1. Що таке теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання?
2. Яка формула використовується для визначення ефективності пластинчастого рекуператора?

3. Що таке коефіцієнт теплопередачі?
4. Які типи рухів потоку в теплообмінниках ви знаєте?
5. Які види теплообмінних апаратів ви знаєте?

ВИСНОВКИ ДО 3 РОЗДІЛУ

У даному розділі описана конструкція та її комплектуючі елементи, які використовувалися для побудови експериментальної моделі, а також описаний принцип роботи моделі. Розроблена та представлена модель за допомогою програмного забезпечення Comsol. Побудовані та представлені графіки залежностей ККД від температур та швидкостей потоків повітря, а також графіки розподілу температур в різних площинах. Створений інтерфейс для керування теплообмінними процесами у експериментальній моделі. Створена та описана лабораторна робота для студентів фізичних та технічних спеціальностей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Під час даної роботи було створено методику комплексного дослідження процесів теплообміну в рекупераційно-вентиляційних системах, а саме:

1. Розроблено комп'ютерну модель за допомогою програмного забезпечення Comsol.
2. Створено програмний інтерфейс для забезпечення контролю фізичних процесів в рекуператорі.
3. Розроблено лабораторну роботу «Визначення ефективності рекуперативного пластинчастого теплообмінника» для студентів фізичних та технічних спеціальностей закладів вищої освіти. В цій лабораторній роботі теоретичні відомості щодо процесів теплообміну та масопереносу поєднані з комп'ютерним моделюванням та експериментальними вимірюваннями, що надасть студентам можливість засвоїти стандартний сучасний набір методів фізичних наукових досліджень. Наявність такої комплексної лабораторної роботи познайомить студентів, зокрема, з вентиляційно-рекупераційними системами та покращить обізнаність у цій сфері. За допомогою програмного середовища Comsol студенти можуть змінювати такі модельні параметри рекуператора (і умов, в яких він працює) як: геометричні розміри конструкції, швидкість надходження повітря, температуру в каналах подачі та виходу повітря. Завдяки цьому з'являється можливість наочно спостерігати за розподілом тепла в рекуператорі в анімаційних 3D-моделях та аналізувати вплив окремих параметрів на цей розподіл. Крім того, забезпечено можливість порівняння результатів моделювання з експериментальними вимірюваннями, проведеними безпосередньо на макеті рекуператора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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. Лацинский А.А. Конструирования сварных химических аппаратов / А.А. Лацинский. – Л.: Машиностроение, 1981. – 382 с.
14. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: 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. Староверова. – 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. Енергозбереження 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. Лацинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лацинский, 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. Стародубцев В.А., Федоров А.Ф. Применение мультимедиа в образовании: комплексный подход. // XV международная конференция «Применение новых технологий в образовании», Троицк, 2004, с. 171-172.
47. Баяндин Д.В. Развитие методики контроля знаний на основе компьютерных моделей. // XIV международная конференция «Применение новых технологий в образовании», Троицк, 2003, с.215-217.
48. Кавтрева О.А., Королев А.А., Мельничук А.П., Смирнов А.В., Стафеев С.К. Система компьютеризированной проверки знаний по физике (результат работы в 2002/2003 учебном году). // Материалы X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2003», Санкт-Петербург, 2003.
49. Арнольд М.В., Гудзенко А.Ф., Федотов М.Б. Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в университетском образовании», Новосибирск, 2001.
50. 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.
51. Федоткин И.М. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификация /И.М. Федоткин, И.С. Гулый/ Киев: Арктур-А, 1998. – 415 с.
52. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин, И.Ю. Бурлай, Н.А. Рюмкин/ К: Техника, 2004. – 312 с.

53. Бухмиров В.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата / В.В. Бухмиров , Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова. – Л.: Машиностроение , 2013. – 124 с.
54. 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..
55. Электронный ресурс: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>