

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



18

no



ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ТИПУ «РОЗСІЛ-ВОДА»

Лабораторний практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістр
спеціальності G4 «Енерговиробництво»*

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 621.577
Д39

Укладачі:	Дешко В.І. Шкляр В.І. Яценко О.І. Недбайло О.М. Власенко Р.В.	док. техн. наук, професор, канд. техн. наук, доцент, док. філос., асистент док. техн. наук, професор інженер, Viessmann
Рецензент:	Шовкалюк М.М.	канд. техн. наук, доцент кафедри Електропостачання, ННІЕЕ
Відповідальний редактор	Буяк Н.А.	канд. техн. наук, ст. викладач.

*Гриф надано кафедрою Теплової та альтернативної енергетики
Навчально наукового інституту теплової та атомної енергетики
(протокол № 21 від 27 червня 2025 р.)*

Д39 Дослідження термодинамічних параметрів робочого циклу та енергетичної ефективності теплового насосу типу «розсіл-вода» [Електронний ресурс] лаб. практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр спец. G4 «Енерговиробництво», / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.І. Дешко, В.І. Шкляр, О.І. Яценко, О.М. Недбайло, Р.В. Власенко – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 38 с.

Навчальний посібник призначений до виконання лабораторного практикуму магістрантами, які навчаються за спеціальністю G4 Енерговиробництво, спеціалізацією G4.02 Теплоенергетика, освітньо-професійна програма «Управління енергоефективністю та інжиніринг теплоенергетичних систем».

В навчальному посібнику розглянуто роботу експериментального стенду з тепловим насосом розсіл –вода, з визначенням термодинамічних параметрів робочого циклу ТН за допомогою його інтерфейсу та електронної діаграми стану робочого тіла, наведена методика розрахунку коефіцієнту перетворення теплоти.

УДК 621.577

Обсяг 2 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ Лабораторного практикуму.....	6
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	6
3. ПРИНЦИПОВА СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	9
4. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ	14
5. ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ	18
6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА ..	27
6.1. Побудова циклу холодоагенту R410A в програмі CoolPack	29
6.2. Розрахунок показника енергетичної ефективності теплового насоса.....	33
6.3. Аналіз результатів та висновки по роботі	34
7. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ	35
8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	36
9. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	37
10. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	37

ВСТУП

Стан справ в енергетичній промисловості та житлово-комунальній сфері України вимагає негайного реформування. Необхідно змінювати саму ідеологію генерації та використання теплової та електричної енергій, диверсифікувати та урізноманітнювати джерела постачання енергоносіїв. Пріоритетними напрямками повинні бути енергозбереження та використання альтернативних відновлюваних джерел енергії. Одним із важливих напрямків в теплозабезпеченні є комбінування різних джерел з метою оптимізації витрат палива. Використання відновлюваних джерел надає певну автономність та незалежність від його традиційних видів.

Новітні системи теплозабезпечення енергоефективних будівель, в багатьох випадках, є комбінованими із високим ступенем автоматизації керування параметрами процесів підтримання норм температурно-вологісного режиму приміщень.

При застосуванні теплонасосних установок у складі систем теплопостачання перевага надається низькотемпературним системам водяного підлогового опалення. Це пов'язано з тим, що при такому виді опалення площа теплообміну між теплоносієм та повітрям в приміщенні значно більша в порівнянні з іншими системами і, відповідно до цього, температурний потенціал теплоносія можна знижувати. Крім того, підлогове опалення забезпечує найбільш фізіологічно комфортні санітарно-гігієнічні умови щодо перебування людини в приміщенні.

Вивчення питань, що пов'язані з організацією ефективного теплозабезпечення приміщень на основі теплонасосних технологій із залученням відновлювальних джерел енергії є актуальним науковим завданням сьогодення, а поширена практична реалізація останнього може значно покращити стан житлово-комунального теплопостачання, звільнивши його від необхідності монопольного використання первинних органічних енергоресурсів, а також поліпшити екологічні показники впливу на довкілля.

Створення та регулярне використання навчальних стендів для ознайомлення із можливостями сучасного енергетичного обладнання, дослідження його експлуатаційних характеристик при різних вихідних параметрах надає змогу значно підвищити ефективність навчального процесу та підвищити рівень кваліфікації студентів. При цьому додатково з'являється можливість проводити аналіз отриманих, під час виконання роботи, експериментальних даних та розвивати навички ефективного використання енергоустановок.

1. МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Мета роботи – закріпити та поглибити знання, отримані при вивченні теплофізичних основ роботи теплового насосу (ТН) типу «розсіл-рідина».

Основні завдання роботи:

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи ТН типу «розсіл-рідина».
2. Визначити термодинамічні параметри робочого циклу ТН за допомогою його інтерфейсу та діаграми стану робочого тіла фреону R410A.
3. Розрахувати показник енергетичної ефективності (коефіцієнт перетворення теплоти – COP) ТН в експлуатаційному режимі.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Тепловий насос – це технічний пристрій, що реалізує перенесення теплоти (безпосереднє використання якої є неефективним) із збільшенням її потенціалу від низькотемпературного джерела до споживача. ТН є трансформаторами теплоти, в яких із використанням фазових переходів робочого тіла здійснюється зворотний термодинамічний цикл [1].

Контур парокомпресійного ТН (рис. 2.1) складається з конденсатора, розширювального клапана (дроселя), випарника, компресора та терморегулятора. Останній здійснює управління процесами передавання теплоти поміж джерелом та споживачем.

Як робоче тіло використовується холодоагент, що циркулює в контурі. Він має певні теплофізичні властивості, що відповідають його здатності кипіти та випаровуватись за низької температури.

Холодоагент в пароподібному стані стискається в компресорі та подається до теплообмінника-конденсатора, де відбувається його

охолодження шляхом передачі теплоти споживачу (системі теплозабезпечення) та перехід до рідкого стану. Далі холодоагент проходить крізь розширювальний клапан для зменшення тиску, потрапляє до теплообмінника-випарника, де нагрівається від теплоти з довкілля (грунту) та випаровується. Таким чином здійснюється робочий цикл ТН із використанням механічної роботи приводу компресора (електроенергії, що споживає двигун) із параметрами, що контролюються терморегулятором.

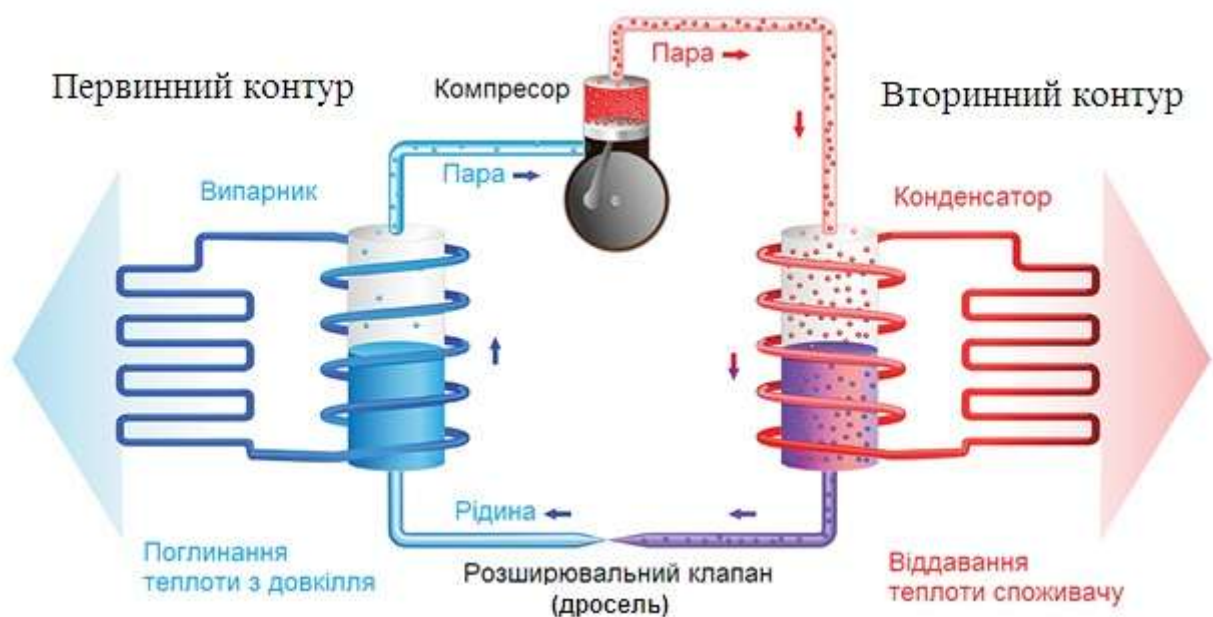


Рисунок 2.1. Схема використання теплового насоса

Наприклад, в теплонасосній системі теплозабезпечення будівлі такий цикл має постійно повторюватись до тих пір, поки температура повітря в приміщенні не досягне наперед заданого значення.

Важливою характеристикою енергетичної ефективності ТН є коефіцієнт перетворення **COP** (Coefficient Of Performance) або ϕ , що характеризує відношення кількості теплоти, що віддана споживачу системи теплозабезпечення, до кількості спожитої електричної енергії:

$$COP = \phi = Q_{\text{ТН}} / N, \quad (2.1)$$

де N – кількість спожитої електричної енергії (електрична потужність), Вт;

$Q_{\text{ТН}}$ – кількість теплоти, що віддана споживачу (до системи теплозабезпечення), Вт.

При проектуванні систем теплозабезпечення із застосуванням теплонасосних установок (ТНУ) необхідно враховувати оптимальний режим експлуатації та техніко-економічне обґрунтування вибору потужності ТН. Для ТНУ можливі [2]:

1. Моновалентний режим – ТН повністю забезпечує сумарне теплове навантаження для потреб опалення та гарячого водопостачання (ГВП).

2. Бівалентно-паралельний режим:

2.1. Бівалентно-паралельний режим – ТН забезпечує більшу частину теплового навантаження. Другий теплогенератор (наприклад, газовий або твердопаливний котел) використовується для покриття пікових навантажень.

2.2. Бівалентно-альтернативний режим – ТН та інший теплогенератор не використовуються одночасно. Замість цього застосовується розподіл річної потреби в енергії відповідними частками поміж ними.

При бівалентно-паралельному режимі можливий «Моноенергетичний режим», коли ТН забезпечує основну частину теплового навантаження опалення та ГВП, а вмонтований в ТН додатковий електричний нагрівач покриває пікові теплові навантаження.

3. ПРИНЦИПОВА СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка (рис. 3.1) складається з ТН 1 типу «розсіл-вода» Viessmann Vitocal 300-G [3] номінальною тепловою потужністю 12 кВт, баків-акумуляторів теплоти (буферних ємкостей) Witocell 100-E 2 та 3 (об'ємом 600 л кожна), ТН 4 типу «повітря-вода» моноблоку Viessmann Vitocal 250-A номінальною тепловою потужністю 7,3 кВт, ТН 5 типу «повітря-вода» спліту Viessmann Vitocal 200-S номінальною тепловою потужністю 8,6 кВт, пластинчастого теплообмінника 6 Danfoss (площею 3,25 м²), що гідравлічно розділяє вторинний контур ТН 1 із паралельно комутованими теплообмінними контурами баків-акумуляторів теплоти 2 та 3, циркуляційного насосу Grundfos UPMGEO 25-85, мембранних баків-експанзоматів Flatvarem (об'ємом 8 л) в кожному з контурів для компенсації зміни об'єму теплоносіїв внаслідок їхнього нагрівання або охолодження, а також допоміжної запірно-регулювальної арматури та контрольовано-вимірювальних пристроїв (зокрема регулятор Vitotronic 200 WO1C), що умовно позначені на принциповій схемі.

У первинному контурі ТН 1 теплоносієм є розсіл – 30%-розчин пропиленгліколю (антифриз) Tyfocor, циркуляція якого здійснюється вбудованим насосом. У вторинних контурах ТН 4 та 5 теплоносієм є технічна вода, циркуляція якого здійснюється відповідними вбудованими насосами. Поверхні трубопроводів та обладнання теплоізовані для запобігання втратам теплоти у довкілля. Регулювання значень витрати та температури теплоносіїв відбувається відповідно до алгоритмів керування регулятора Vitotronic 200 WO1C за користувацькими налаштуваннями [3].

Для виконання завдань лабораторної роботи використовується обладнання та прилади, що схематично обмежені рамкою ліворуч (рис. 3.1).

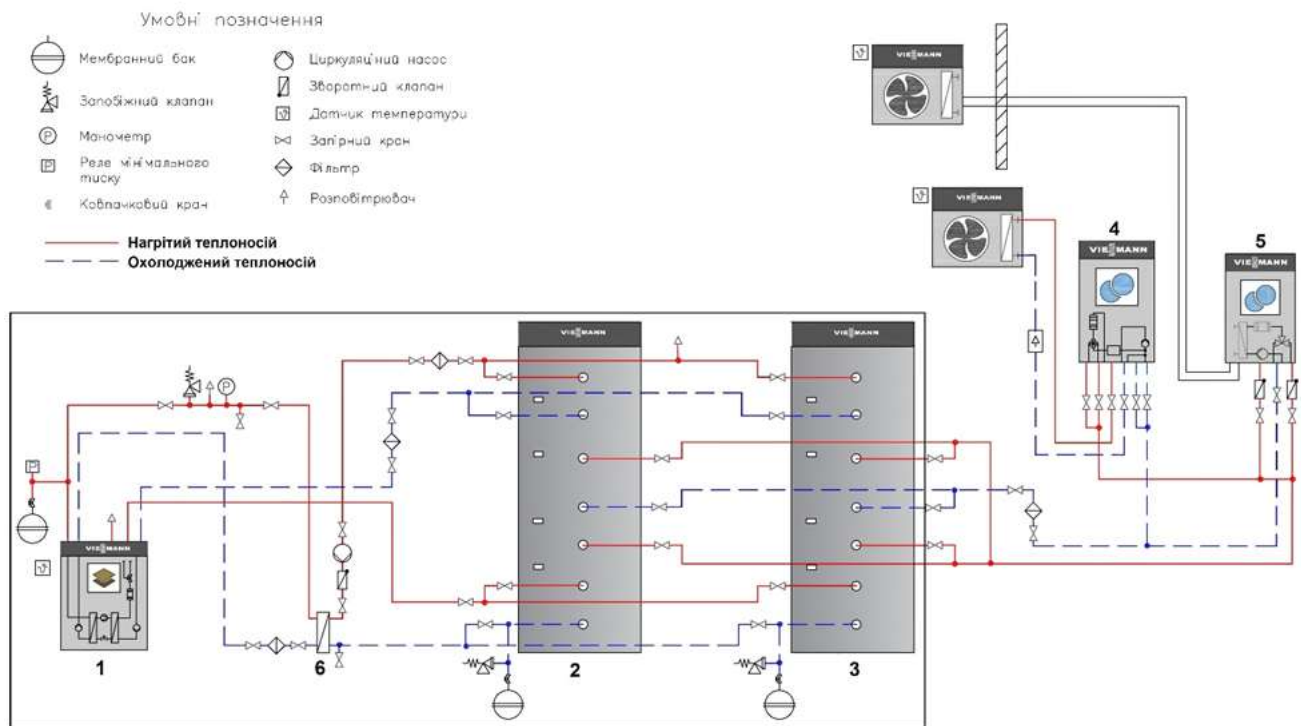


Рисунок 3.1. Принципова схема лабораторної установки:

1 – тепловий насос типу «розсіл-вода» Viessmann Vitocal 300-G;
2, 3 – баки-акумулятори теплоти (буферні ємкості); 4 – тепловий насос типу «повітря-вода» моноблок Viessmann Vitocal 250-A; 5 – тепловий насос типу «повітря-вода» спліт Viessmann Vitocal 200-S; 6 – теплообмінник пластинчастий

Конструкція ТН Viessmann Vitocal 300-G показана на рисунку 3.2. ТН призначений для нагрівання теплоносія в системі опалення приміщень і нагрівання питної води в моновалентному режимі експлуатації [3].

Налаштування режиму роботи та моніторинг термодинамічних параметрів, значення яких отримуються з первинних контрольно-вимірювальних приладів, що розміщені в холодильному контурі ТН, здійснюється за допомогою інтерфейсу регулятора 1 Vitotronic 200 WO1C, що розташований зверху на корпусі ТН.

Елементи ТН зібрані у моноблоці, що знаходиться у лабораторному приміщенні. В корпусі ТН розміщені електричний інвертор 2, електричний проточний нагрівач 3; циркуляційний насос первинного контуру 4; сепаратор 5, циркуляційний насос вторинного контуру 6, теплообмінник – конденсатор 7, електронний терморегулюючий вентиль (дреселювальний

пристрій), скрол-компресор та теплообмінник – випарник (на схемі не позначені). Робочим тілом в контурі ТН є холодоагент фреон R410A. Циркуляційні насоси первинного і вторинного контурів мають окремі напірно-витратні характеристики, що дозволяють забезпечити необхідні гідравлічні умови теплообміну поміж фреоном та теплоносіями, відповідно, у випарнику та конденсаторі.

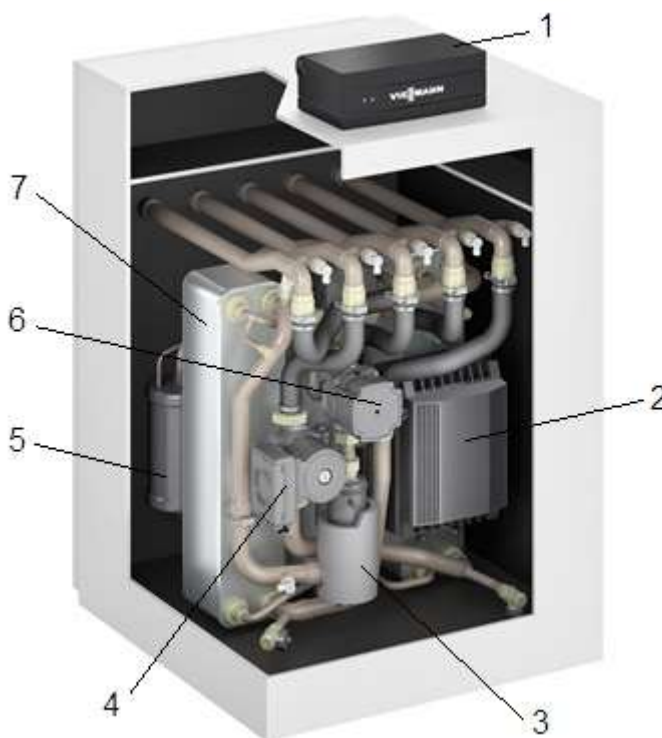


Рисунок 3.2. Конструкція теплового насосу Viessmann Vitocal 300-G [3]:

1 – регулятор Vitotronic 200 WO1C; 2 – електричний інвертор; 3 – електричний проточний нагрівач; 4 – циркуляційний насос первинного контуру; 5 – сепаратор; 6 – циркуляційний насос вторинного контуру; 7 – теплообмінник – конденсатор.

Електричний проточний нагрівач **3** у разі необхідності дозволяє догрівати теплоносій вторинного контуру до заданої температури. Її максимальне значення обмежене 60°C .

Електроживлення ТН здійснюється від трифазної мережі 380 В / 50 Гц. Номінальна електрична потужність 1,86 кВт. Клас енергетичної ефективності ТН (згідно директиви ЄС № 813/2013) – A+++.

Діаграма робочих параметрів ТН Viessmann 300-G BWC 301.C.12 наведена на рисунку 3.3. Показані залежності теплової потужності від температури розсолу первинного контуру на вході до ТН для досягнення окремих значень температури теплоносія вторинного контуру на виході з ТН, а також зона зміни теплової потужності із використанням додатково електричного проточного нагрівача.

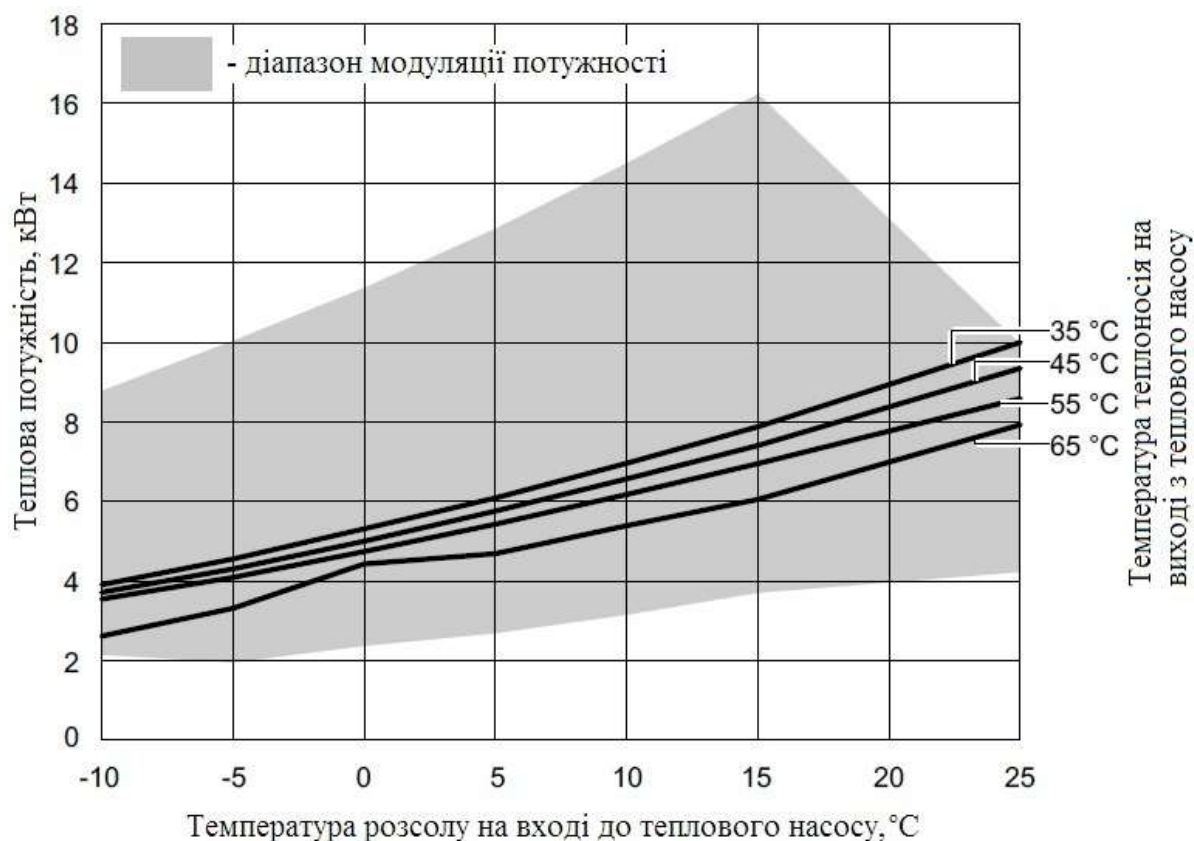


Рисунок 3.3. Діаграма теплової потужності теплового насоса Viessmann 300-G BWC 301.C.12 в залежності від температури теплоносіїв первинного та вторинного контурів [3]

За допомогою частини даної гідравлічної системи (схематично обмежена рамкою ліворуч, рисунок 3.1) можливо використовувати по чергово баки-акумулятори, відповідно, як джерело та споживач теплоти. Комутація вторинного контуру ТН за допомогою запірно-регулювальної арматури передбачає охолодження теплоносія в одному з баків водночас із нагріванням в другому під час робочого режиму з наперед заданими параметрами щодо

кінцевої температури нагрівання об'єму. Таким чином, в лабораторних умовах, імітується експлуатація ТН типу «розсіл-вода» протягом кінцевого терміну часу.

4. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ

Визначення термодинамічних параметрів робочого циклу ТН 300-G BWC 301.C.12 здійснюється за допомогою користувацького інтерфейсу регулятора Vitotronic 200 WO1C та електронної діаграми стану робочого тіла фреону R410A шляхом побудови циклу ТН за наявними значеннями.

Нижче наведений алгоритм дій для виконання завдань лабораторної роботи за допомогою меню регулятора.

Визначення всіх термодинамічних параметрів циклу, що характеризують режим роботи ТН, відбувається за допомогою інтерфейсу блоку регулятора (рис. 4.1). Отримані данні дозволяють проаналізувати їх взаємну залежність між собою в дослідному діапазоні змін та зробити висновки щодо можливості регулювання окремих технологічних показників експлуатації ТН.



Рисунок 4.1. Інтерфейс блоку регулятора Vitotronic 200 WO1C.

Схема позначень та значення параметрів режиму роботи теплового насосу Viessmann 300-G [3]

Для побудови робочого циклу ТН на р-h-діаграмі стану холодоагенту R410A [4] (рис. 4.2) необхідно скористатись значеннями термодинамічних параметрів з інтерфейсу блоку регулятора (рис. 4.1):

1. За відповідними значеннями тиску холодоагенту p_1 до та p_2 після стискання необхідно побудувати дві ізобари (горизонтальні прямі).

2. Точка **1a** циклу знаходиться на перетині ізобари p_1 з правою граничною кривою, що характеризує параметри стану сухої насиченої пари холодоагенту.

3. Точка **1** циклу знаходиться на перетині ізобари p_1 з ізотермічною кривою t_1 , що відповідає значенню температури холодоагенту до стискання (температура холодоагенту після випарника). Процес **1a – 1** характеризує перегрів сухої насиченої пари зі збільшенням температури, питомої ентальпії, питомої ентропії та питомого об'єму.

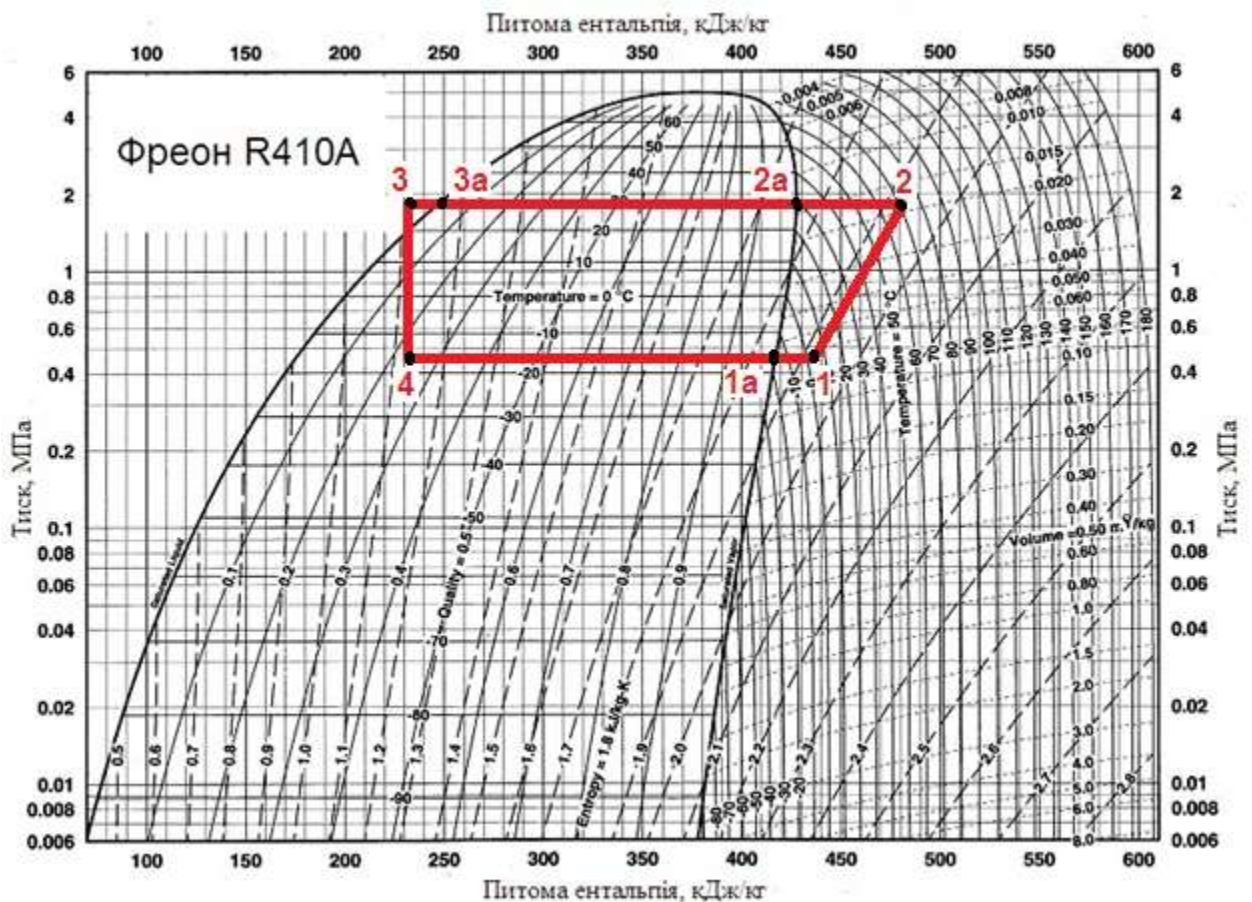


Рисунок 4.2. Діаграма стану холодоагенту R410A [4]

4. Точка **2** циклу знаходиться на перетині ізобари p_2 із ізотермічною кривою, що відповідає значенню розрахункової температури t_2 холодоагенту після стискання. Процес **1 – 2** характеризує адіабатне стискання газоподібного холодоагенту у компресорі зі сталою питомою ентропією, збільшенням тиску, температури, питомої ентальпії та зменшенням питомого об'єму.

При цьому споживається електрична потужність із відповідним відносним значенням у відсотках до номінальної.

5. Точка **2a** циклу знаходиться на перетині ізобари p_2 з правою граничною кривою, що характеризує параметри стану сухої насиченої пари холодоагенту. Процес **2 – 2a** характеризує охолодження перегрітої пари в теплообміннику-конденсаторі зі зменшенням температури, питомою ентальпії, питомою ентропії та питомого об'єму.

6. Точка **3a** циклу знаходиться на перетині ізобари p_2 з лівою граничною кривою, що характеризує параметри стану холодоагенту у рідкому стані при температурі насичення. Процес **2a – 3a** характеризує конденсацію пари при сталій температурі (температурі насичення при тиску p_2) зі зменшенням питомою ентальпії, питомою ентропії та питомого об'єму.

На рисунку 4.1 показана розрахункова температура конденсації холодоагенту.

7. Процес **3a – 3** називається переохолодженням холодоагенту. Положення точки **3** визначається на перетині ізобари p_2 і температури t_3 холодоагенту на виході з конденсатору, яка буде на 1-3 градуси вище температури зворотної води вторинного контуру (рис. 4.3).

8. Точки **3** та **4** циклу знаходяться на перетинах ізоентальпії (вертикальної прямої лінії), верхньої p_2 та нижньої p_1 ізобарних прямих. Процес **3 – 4** характеризує ізоентальпійне дроселювання рідкого холодоагенту через електронний терморегулюючий вентиль (дроселювальний пристій) зі зменшенням тиску, температури та збільшенням питомого об'єму, питомою ентропії.

Відкриття прохідного перерізу дроселя має відповідне відносне значення у відсотках до максимального (рис. 4.1).

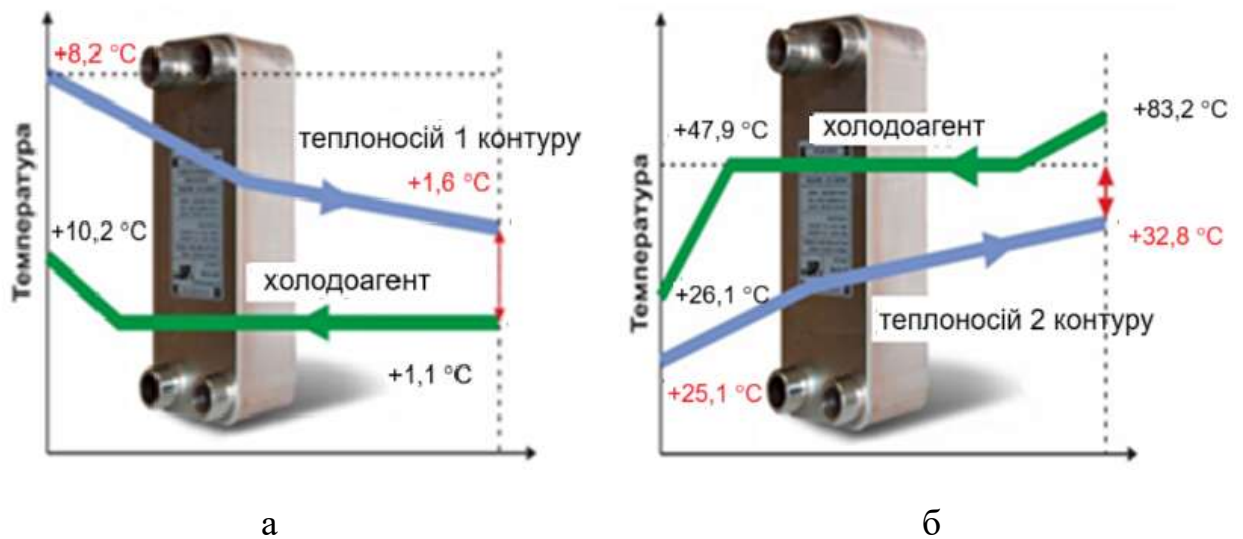


Рисунок 4.3. Розподіл температур в пластинчастих теплообмінниках ТН:

а – випарник; б – конденстор

9. Процес **4 – 1а** характеризує пароутворення у випарнику при сталій температурі зі збільшенням питомої ентальпії, питомої ентропії та питомого об'єму.

В процесі **2 – 3** теплота відводиться від холодоагенту до теплоносія вторинного контуру, а в процесі **4 – 1** теплота від первинного контуру підводиться до холодоагенту. Циклічність роботи ТН досягається використанням механічної роботи компресора, завдяки якому відбувається рух холодоагенту та послідовне повторення всіх вищезазначених процесів.

Окремо на дисплеї показані відносні значення потужності циркуляційних насосів у відсотках до номінальної, відповідно, первинного та вторинного контурів циркуляції теплоносіїв.

5. ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

До виконання наступних дій необхідно увімкнути електричне живлення теплового насосу в лабораторному приміщенні.

Регулятор теплового насосу Viessmann 300-G у закритому вигляді рис. 5.1, а). Для регулятора необхідно відкрити верхню 1 та нижню 2 кришки і натиснути кнопку пуск 3 (рис. 5.1, б). Після цього індикатор (рис. 5.1, б, поз. 4) змінює колір на зелений і відбувається процес завантаження програмного забезпечення керування регулятора теплового насосу, який зображується на екрані 5.



а



б

Рисунок 5.1. Регулятор теплового насосу Viessmann 300-G:
а – у закритому вигляді; б – готовий до пуску

Після увімкнення регулятора теплового насосу екран (рис. 5.2) переходить в режим standby (очікування).



Рисунок 5.2. Регулятор теплового насосу на екрані в режимі «standby»

Для увімкнення теплового насосу в роботу необхідно активувати режим нагрівання буферної ємкості теплоти. Для цього необхідно натиснути кнопку «**Меню**» на панелі керування (рис. 5.3, а, поз 1).



а



б

Рисунок 5.3. Регулятор теплового насосу

Після завантаження діалогового меню (рис. 5.3, б) за допомогою керуючих кнопок **1** («**Стрілка донизу**») обрати пункт «**Установка**» і підтвердити натисканням кнопки «**ОК**» (рис. 5.3, б, поз. 2).

В діалоговому меню, що з'явиться, необхідно обрати пункт «**Врем.прог. буферной емк.**» і натиснути кнопку «**ОК**» (рис. 5.4).

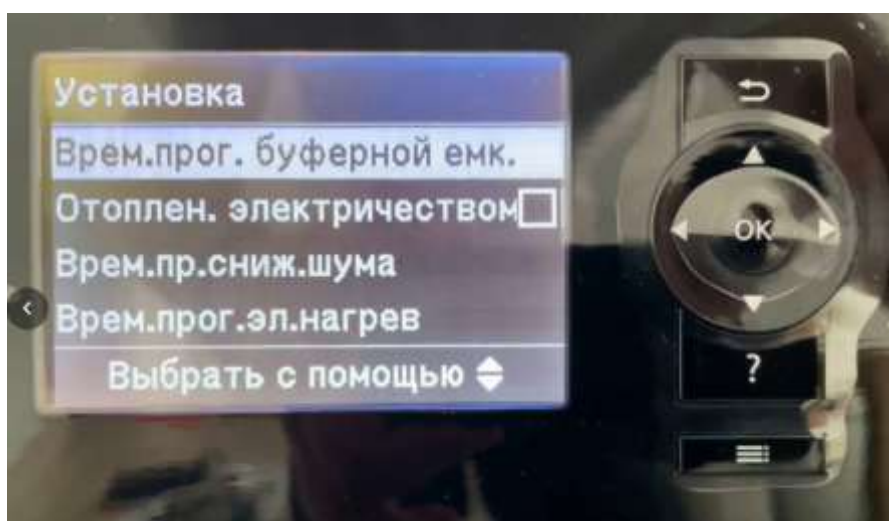


Рисунок 5.4. Вибір призначення ТН

Після цього в діалоговому меню, що з'явиться, необхідно вибрати пункт «Понедельник-воскресен.» і натиснути кнопку «ОК» (рис. 5.5).



Рисунок 5.5. Вибір умови роботи ТН

В діалоговому меню, що з'явиться, необхідно змінити режим нагрівання буферної ємкості з режиму «Вверху» на режим «Пост. знач». Для цього потрібно послідовним натисканням кнопки «ОК» переводити курсор на поле



Рисунок 5.6. Послідовність зміни режимів нагрівання буферної ємкості

Кнопками «Стрілка вліво»/«Стрілка вправо» необхідно вибрати режим «Пост. знач» і підтвердити натисканням кнопки «ОК» (рис. 5.7).

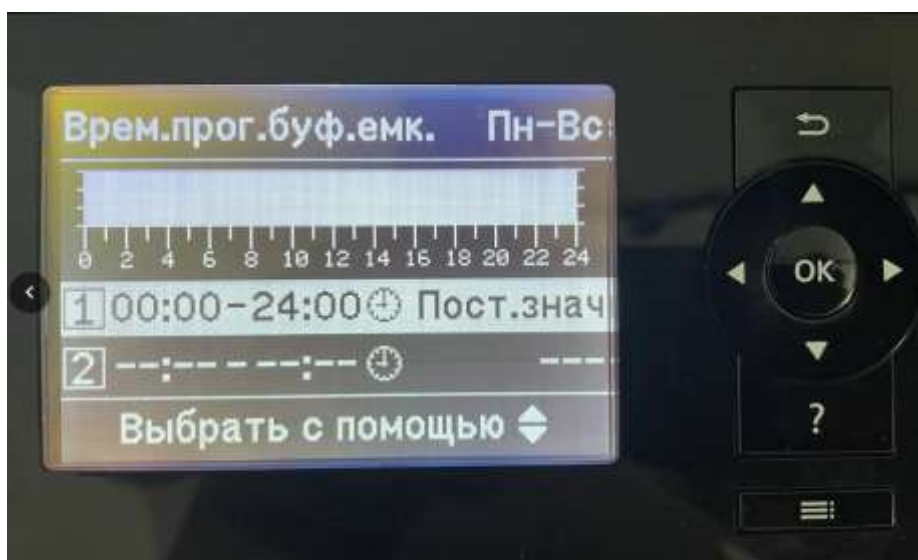


Рисунок 5.7. Остаточный вид интерфейсу режима нагревания буферной емкости

Натисканням кнопки «Назад» потрібно повернутись на головний екран (рис.

Після встановлення режиму роботи «Пост.знач» контролер запускає процес увімкнення теплового насосу. При цьому починають працювати циркуляційні насоси первинного та вторинного контурів, а також циркуляційний насос контуру між буферною ємкістю та теплообмінником первинного контуру

теплового насосу. Всі ці параметри відображаються в сервісному меню. Для доступу в сервісне меню необхідно натиснути одночасно і утримувати дві кнопки: «ОК» і «Меню». Утримувати до того, поки не відкриється сервісне меню (приблизно 3-4 с) (рис. 5.9).



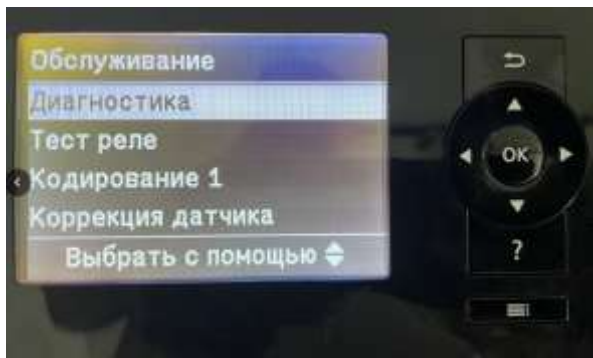
Рисунок 5.8. Повернення в головний екран



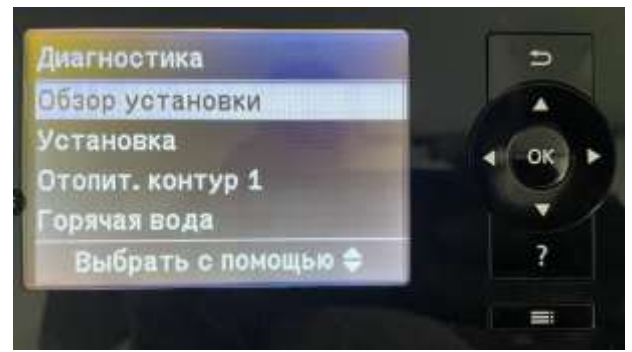
Рисунок 5.9. Повернення в головне меню

Натисканням кнопки «ОК» заходимо в пункт меню «Діагностика» (рис. 5.10, а), а потім за допомогою кнопки «ОК» обираємо пункт меню «Обзор установки» (рис. 5.10, б).

12. Після завантаження на екрані відображаються символи роботи циркуляційних насосів первинного і вторинного контурів, температури теплоносія в подавальному/зворотному трубопроводах первинного і вторинного контурів (рис. 5.11).



а



б

Рисунок 5.10. Перехід в меню діагностика та огляд установки



Рисунок 5.11. Інформація про працююче обладнання

Натисканням кнопки «Стрілка вправо» здійснюємо перемикання на екран праворуч, на якому відображається задана (в даному випадку $+50^{\circ}\text{C}$) і фактична (в даному випадку $+22^{\circ}\text{C}$) температури буферної ємності (рис. 5.12).



Рисунок 5.12. Інформація про температури води в буферній ємності

Натисканням кнопки «Стрілка донизу» здійснюємо перемикання на екран, де відображаються параметри фреону в холодильному контурі теплового насосу (рис. 5.13).



Рисунок 5. 13. Параметри фреону в холодильному контурі теплового насосу

Тепловий насос запускається до роботи приблизно за 2 хв. після активації режиму нагрівання буферної ємкості. Через 10 хвилин після пуску теплового насосу можна проводити зняття даних з інтерфейсу контролера та занести їх до таблиці 5.1 для наступного аналізу після побудови циклу на діаграмі (розділ

Після проведення вимірів, тепловий насос необхідно вимкнути. Для цього необхідно вимкнути режим нагрівання буферної ємкості з постійною температурою теплоносія натиснувши кнопку «Меню» і виконати пункти 4-6, які наведені вище.

Таблиця 5.1. Параметри робочих середовищ з інтерфейсу контролера

	Назва	Позначення	Величина
	Температура теплоносія первинного контуру на вході до теплового насосу, °С.	t_1	
	Температура теплоносія первинного контуру на виході з теплового насосу, °С.	t_1	
	Температура теплоносія вторинного контуру на вході до теплового насосу, °С.	t_1	
	Температура теплоносія вторинного контуру на виході з теплового насосу, °С.	t_1	
	Температура холодоагенту перед компресором, °С.	t_1	
	Тиск холодоагенту перед компресором, бар.	p_1	
	Розрахункова температура кипіння холодоагенту, °С.	$t_{н1}$	
	Задана величина перегріву холодоагенту перед компресором, К.		
	Фактична величина перегріву холодоагенту перед компресором, К.		
	Температура холодоагенту після компресору, °С.	t_2	
	Тиск холодоагенту після компресору, бар	p_2	
	Розрахункова температура конденсації холодоагенту, °С	$t_{н2}$	
	Фактична температура конденсації холодоагенту, °С	t_2	

В діалоговому меню, що з'явиться, необхідно змінити режим нагрівання буферної ємкості з режиму «Пост.знач» на режим «Норма». Для цього потрібно послідовним натисканням кнопки «ОК» переводити курсор на поле

Кнопками «Стрілка вліво»/«Стрілка вправо» необхідно вибрати режим «Норма» і підтвердити натисканням кнопки «ОК» (рис. 5.14).

Натисканням кнопки «Назад» (див. рис. 5.8, поз.1) потрібно повернутись до головного екрану(рис. 5.2)

Через приблизно 2 хв. контролер зупинить роботу компресору. Після цього необхідно вимкнути живлення регулятора теплового насосу

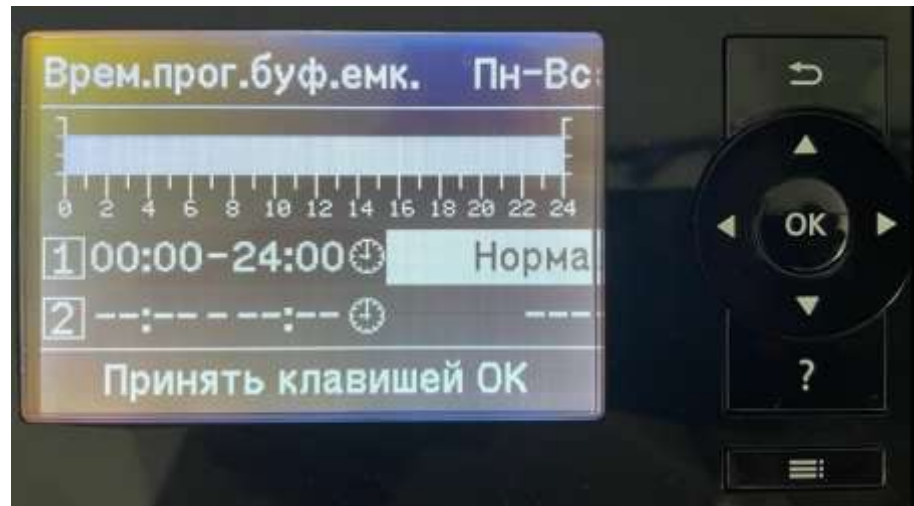


Рисунок 5.14. Обрання режиму «Норма» для завершення роботи

За допомогою р-*h* діаграми (рис. 4.2) або за наведеним нижче алгоритмом, потрібно визначити всі значення інших термодинамічних параметрів та занести їх до таблиці 6.1.

6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Для визначення показника енергетичної ефективності (коефіцієнта перетворення COP) ТН в експлуатаційному режимі необхідно виконати – 7 вимірювань з інтервалом 5 хвилин і фіксацією параметрів робочих середовищ зазначених в таблиці 5.1. За наведеним нижче алгоритмом побудувати процес роботи ТН в **p-h** діаграмі і визначити всі значення інших термодинамічних параметрів та занести їх до таблиці 6.1.

Пакет комп'ютерних програм «CoolPack» – це зібрання програм моделювання, які використовуються для проектування, аналізу та оптимізації систем охолодження та визначення параметрів холодоагентів [5].

Всі програми в пакеті «CoolPack» розділені на 6 груп, кожену з яких можна побачити на панелі інструментів (рис. 6.1):

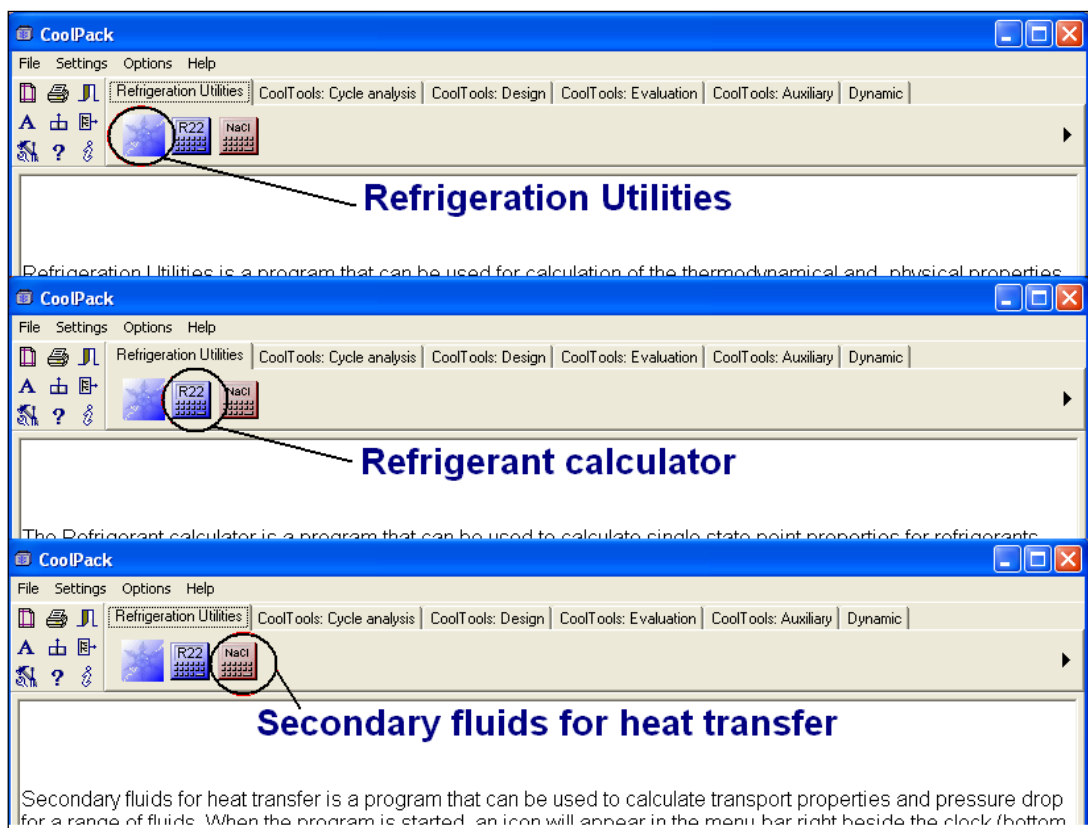


Рисунок 6.1. Три вкладки робочого вікна пакету програм «CoolPack».

1. Refrigeration Utilities – властивості холодильних агентів.
2. Cool Tools: Cycle analysis – аналіз циклів систем охолодження.
3. Cool Tools: Design – проектування систем охолодження.
4. Cool Tools: Evaluation – енергетичний аналіз системи охолодження, та розрахунок шляхів збереження енергії.
5. Cool Tools: Auxiliary – допоміжні засоби для аналізу та розрахунку систем охолодження.
6. Dynamic – динаміка зміни температури холодоагента.

Для виконання лабораторної роботи будемо використовувати першу групу програм пакету «CoolPack», а саме – Refrigeration Utilities.

Refrigeration Utilities – група програм, яка може використовуватись для аналізу і обчислення термодинамічних і фізичних властивостей різних холодильних агентів. Також вона дає можливість виконувати прості обчислення для стандартних циклів охолодження.

Група програм Refrigeration Utilities має наступні особливості:

- можливість побудови $lgp-h$, $T-s$ та $h-s$ діаграм для ряду холодильних агентів;
- обчислення стандартного циклу охолодження;
- таблиці насиченості холодильних агентів;
- таблиці термодинамічних і фізичних властивостей холодильних агентів;
- можливість побудови $h-x$ діаграми (ентальпія – ступінь вологості) для вологого повітря при тиску в межах від 0,014 до 50 бар.

Група програм Refrigeration Utilities включає в себе три програми (рис. 4), а саме: безпосередньо Refrigeration Utilities, Refrigerant calculator та Secondary fluids for heat transfer, які використовуються для визначення окремих точкових характеристик холодоагентів.

6.1. Побудова циклу холодоагенту R410A в програмі CoolPack

Для роботи в логарифмічній **p-h** діаграмі потрібно обрати інструмент програми CoolPack «Refrigeration Utilities» [5]. В даному інструменті натиснути на іконку з графіком під назвою «Log(p)-h diagram» (рис. 6.2).

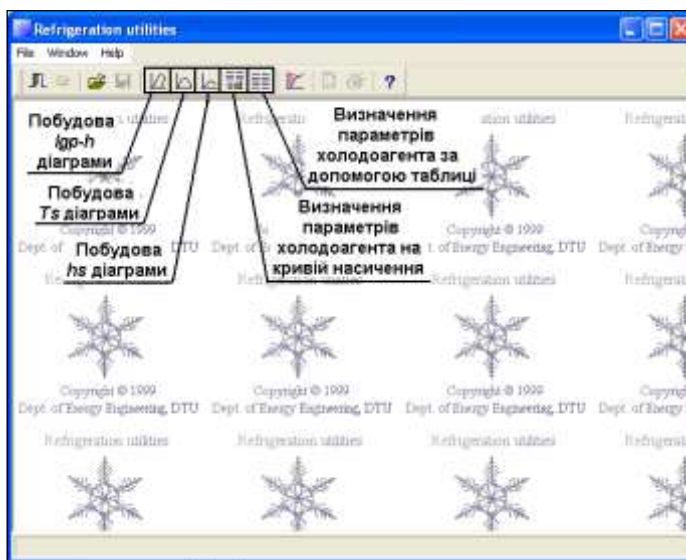


Рисунок 6.2. Вид робочого вікна програми Refrigeration Utilities

Далі обирається холодоагент R410A (рис. 6.3) та налаштовуються межі

п
а
р
а
м
е
т
р
і
в

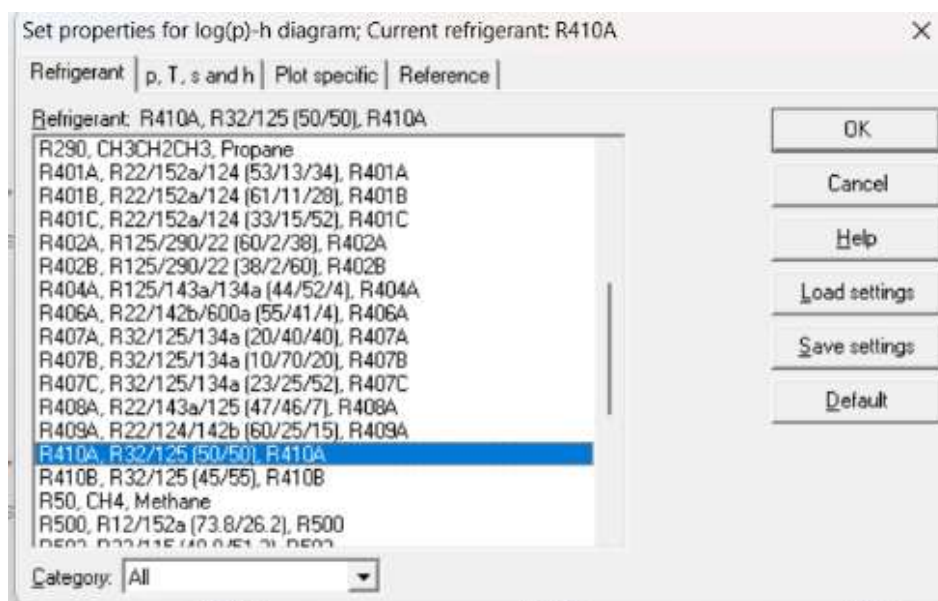


Рисунок 6.3. Допоміжне вікно для побудови «Log(p)-h diagram»: вкладка для вибору холодоагента

д
і
а
г

Set properties for log(p)-h diagram; Current refrigerant: R410A

Refrigerant | p, T, s and h | Plot specific | Reference

Pressure: Bar Max [Bar/kPa]: 40 (= 62.5 °C) kPa Min [Bar/kPa]: 5 (= -14.1 °C)

Entropy: Step [J/(kg k)]: 50

Temperature: Max [°C]: 150 Step: 5 Numbering interval: 20

Enthalpy [kJ/kg]: Step: 20 Numbering interval: 20 Zero factor: 0

Data for R410A:
 TMax = 1000.00 °C T_critical = 74.67 °C
 TMin = -100.00 °C
 PMax = 40 bar P_critical = 51.737 bar
 PMin = 0.0436503 bar

OK
 Cancel
 Help
 Load settings
 Save settings
 Default

Рисунок 6.4. Налаштування p-h діаграми для холодоагенту R410A

Також програма дає можливість налаштувати густоту побудови ізохор та ізобар на діаграмі (вкладка Plot specific, див. рис. 6.4).

Задавши всі необхідні параметри, тиснемо на «OK» і програма буде «Log(p)-h diagram» для заданого холодоагенту (рис. 6.5).

Послідовність побудови циклу в CoolPack:

1. На діаграму наноситься нижня ізобарна лінія з тиском p_1 .
2. Точка **1a** розміщується на перетині ізобари p_1 та правої граничної кривої.
3. Точка **1** розміщується в області перегрітої пари на перетині ізобари p_1 та ізотерми t_1 .
4. На діаграму наноситься ізобара p_2 .
5. Точка **2** розміщується в області перегрітої пари на перетині ізобари p_2 та ізотерми t_2 .
6. Точки **1** та **2** з'єднуються між собою прямою лінією (процес **1-2** адиабатний).

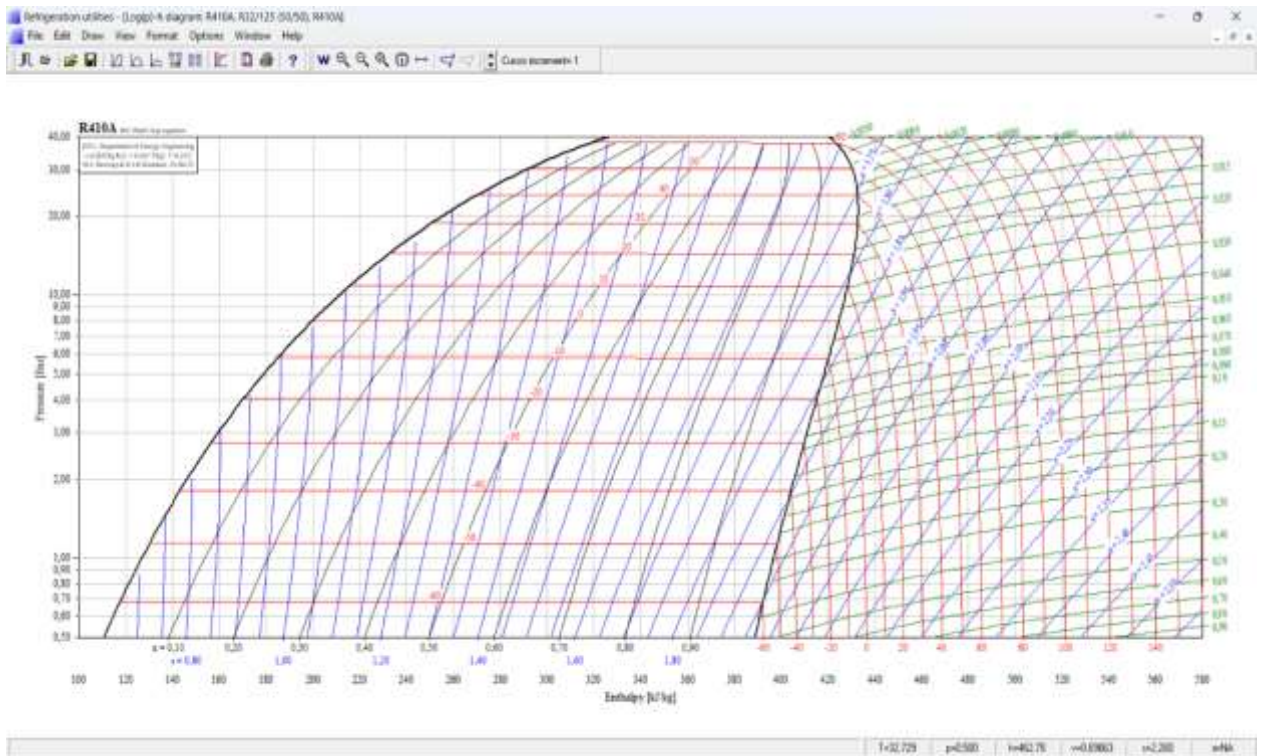


Рисунок 6.5. «Log(p)-h diagram» для заданого холодоагенту R410A

7. Точка **2a** розміщується на перетині ізобари p_2 і правої граничної кривої.
8. Точка **3a** розміщується на граничній кривій на перетині ізобари p_2 та лівої граничної кривої.
9. Точка **3** розміщується в області рідини на перетині верхньої ізобари та ізотерми t_3 .
10. Точка **4** розміщується в області вологої насиченої пари на перетині ізобари p_1 та ентальпії h_3 .
11. Точки **3** та **4** з'єднуються між собою вертикальною прямою лінією (процес 3-4 ізоентальпійний).

Приклад побудови циклу для вихідних даних (рис. 4.1) представлено на рисунку 6.6.

Після побудови циклу необхідно виписати параметри у всіх точках циклу та заповнити таблицю 6.1.

Визначення всіх термодинамічних параметрів циклу, що характеризують режим роботи ТН, дозволяє проаналізувати їхню взаємну

залежність між собою в дослідному діапазоні змін та зробити висновки щодо можливості регулювання при цьому окремих технологічних показників експлуатації ТН.

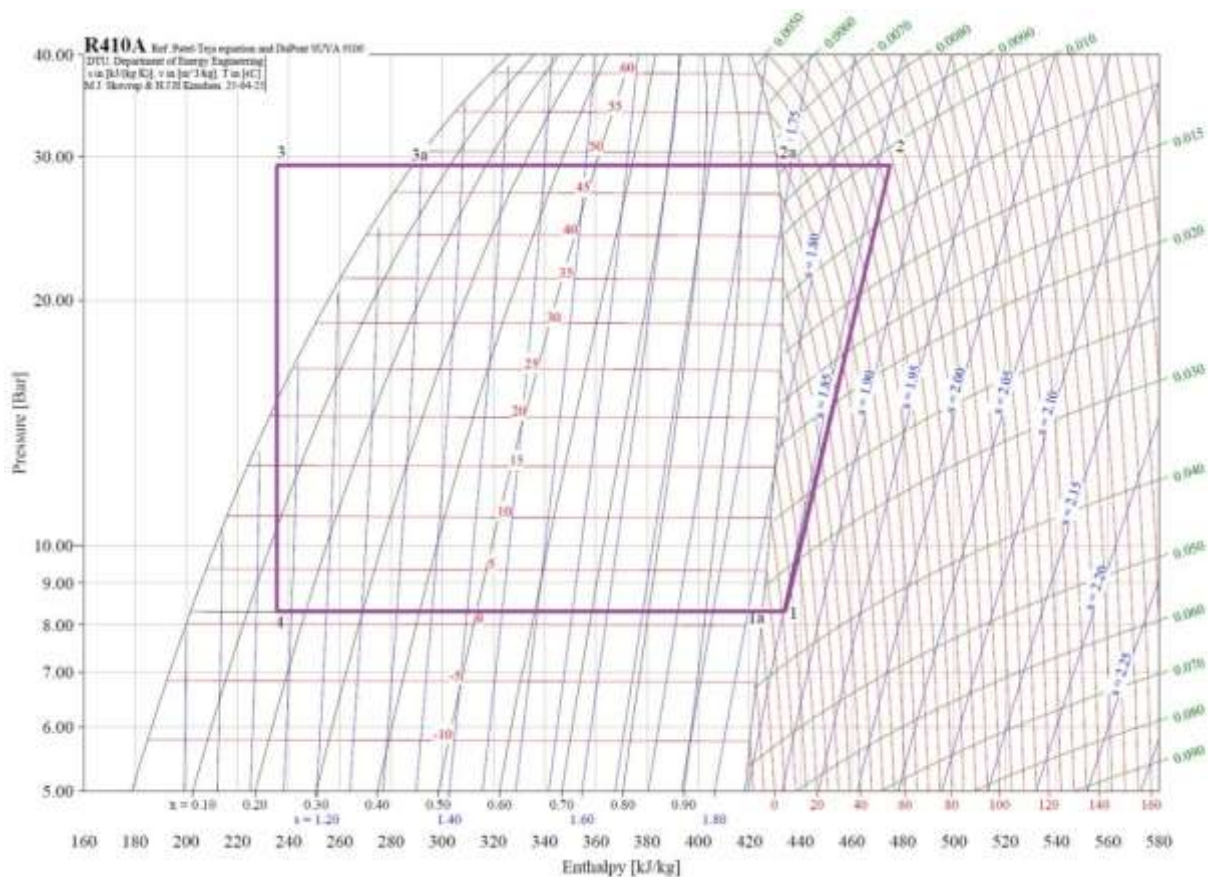


Рисунок 6.6. Приклад побудованого циклу в програмі CoolPack

Таблиця 6.1. Результати визначення термодинамічних параметрів робочого циклу ТН

№	Час	Точка циклу	Температура	Тиск	Питомий об'єм	Питома ентальпія	Ентропія,	COP
			°C	бар	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг·К	
		1a						
		2a						
		3a						

Цикл також можна побудувати автоматичним інструментом програми. Для цього у вкладці «Options» потрібно обрати «Input cycle» та задати основні параметри циклу у вікні як на рисунку 6.7.

Рисунок 6.7. Приклад налаштувань для автоматичної побудови циклу в CoolPack

6.2. Розрахунок показника енергетичної ефективності теплового насоса

Розрахунок показника енергетичної ефективності (коефіцієнта перетворення COP) ТН в експлуатаційному режимі здійснюється за допомогою значень ентальпії в характерних точках процесу.

Необхідно скористатись побудованим за термодинамічними параметрами на діаграмі стану холодоагенту R410A циклом роботи ТН та розрахувати за формулою:

$$\varphi_1 = (h_2 - h_3)/(h_2 - h_1), \quad (6.1)$$

де $(h_2 - h_3)$, кДж/кг – кількість теплоти, яка віддана фреоном холодильного контуру ТН у вторинний контур споживача (систему тепlopостачання), $(h_2 - h_1)$, кДж/кг – кількість зовнішньої роботи (електричної енергії) для здійснення циклу ТН.

6.3. Аналіз результатів та висновки по роботі

Обробка кожного досліду проводиться відповідно до розділів 6.1 та 6.2 і результати заносяться у таблицю 6.1. Результати використовують для побудови графіків зміни в часі: температур, ентальпій в характерних точках та COP циклу. Пояснити різницю значень φ_1 та φ_2 .

7. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Лабораторний практикум проводити у наступній послідовності:

1. У відповідності до отриманих експериментальних даних побудувати графічне зображення циклу ТН на «Log(p)-h diagram» в програмному середовищі «CoolPack» з визначенням параметрів робочого тіла в характерних точках циклу та розрахувати COP циклу.

2. Після побудови кожної точки її параметри заносяться до відповідних таблиць циклів.

3. Побудовані цикли повинні бути збережені на електронному носії та роздруковані у максимально можливому масштабі.

До звіту входять: мета роботи, необхідні теоретичні відомості, роздруковані цикли у Log(p)-h діаграмі, відповідні таблиці, розрахунки і висновки.

8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Який принцип роботи ТН?
2. Які режими експлуатації можливі для ТНУ?
3. З яких конструктивних елементів складається ТН?
4. Як змінюються термодинамічні параметри холодоагенту при стисненні в компресорі?
5. Як змінюються термодинамічні параметри холодоагенту при конденсації в конденсаторі?
6. Як змінюються термодинамічні параметри холодоагенту при дроселюванні через електронний терморегулюючий вентиль?
7. Як змінюються термодинамічні параметри холодоагенту при пароутворенні у випарнику?
8. Як визначається енергетична ефективність ТН?

9. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник / В.М. Арсеньєв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с.
2. CEN/TS 14825, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions (Кондиціонери повітря, блоки з охолоджуючою рідиною і теплові насоси з компресорами, які мають електричний привід, для охолодження і нагрівання середовища – Випробування і класифікація відносно умов завантаження).
3. Viessmann. Інструкція з проектування. Vitocal. – Розсільно-водяний і водо-водяний теплові насоси 1- і 2-ступеневий, 1,7 - 117,8 кВт. 2023. 244 с.
4. Діаграма Мольтє холодоагенту R-410A [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://freons.xyz/wp-content/uploads/2020/10/r410a-molier-dupont.jpg>
5. Програма CoolPack [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.holod-konsultant.ru/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1584956886>.

10. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник / В.М. Арсеньєв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с.
2. CEN/TS 14825, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions (Кондиціонери повітря, блоки з охолоджуючою рідиною і теплові насоси з компресорами, які мають електричний привід, для охолодження і нагрівання середовища – Випробування і класифікація відносно умов завантаження).

3. Viessmann. Інструкція з проектування. Vitocal. – Розсільно-водяний і водо-водяний теплові насоси 1- і 2-ступеневий, 1,7 - 117,8 кВт. 2023. 244 с.
4. Діаграма Мольтє холодоагенту R-410A [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://freons.xyz/wp-content/uploads/2020/10/r410a-molier-dupont.jpg>
5. Програма CoolPack [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.holod-konsultant.ru/cgi-bin/yabb/YaBB.pl?num=1584956886>.