

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка системи опалення опалення на основі теплового
насоса

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

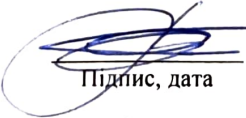
Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-22-1


Підпис


Марчук І.О.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

доц. Тимошук О.Г.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

С.І. Тимощук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

24 12 2023 р

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень магістр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

д.т.н., проф. Поліщук О.С.

_____ .2023р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Марчук Ілля Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи опалення на основі теплового насоса

керівник роботи Тимошук Олександр Григорович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 08 2023 р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики теплових насосів

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка системи опалення з використанням теплового насоса. 3. Розрахунки елементів системи опалення з використанням теплового насоса. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Теплові насоси та схеми їх застосування (ДО, А1). 2. Схеми роботи теплового насосу (ДТ, А1). 3. Теплообмінник регеративний (СК, А1). 4. Компресор фреоновий (СК, А1). 5. Маслоохолоджувач (СК, А1). 6. Колінчатий вал (А2). 7. Схема та цикл теплонасосної установки (СЗ, А1). 8. Тепловий насос (РР, А1)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 30.10.23р.	
2 Розробка системи опалення з використанням теплового насоса.	до 10.11.23р.	
3. Розрахунки елементів системи опалення з використанням теплового насоса.	до 20.11.23р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.23р.	

Студент


Підпис

І.О. Марчук
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

О.Г. Тимошук
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Марчук Ілля Олександрович
2. Тема магістерської роботи Розробка системи опалення на основі теплового насоса
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 79
5. Проблема підвищення енергоефективності суспільного виробництва виникає сьогодні як одна з головних у процесі відродження економіки України. Попередня оцінка потенціалу енергозбереження показує, що його обсяг складе 42-48 % від загального обсягу споживання первинних енергоносіїв, а впровадження системи раціонального енерговикористання прямо зв'язано з рішенням численних економічних і екологічних питань. Метою роботи є розробка системи опалення на основі теплового насоса, що є актуальним завданням як для промислових так і побутових потреб. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому розділі здійснюється розробка системи опалення з використанням теплового насоса. В третьому розділі розраховано елементи системи опалення з використанням теплового насоса.

Підпис студента _____

"23" 12 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол № 3 від "29" 12 2023 р.

Оцінка проекту ЕК _____

Рекомендації ЕК _____





Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

"29" 12 2023 р.

ЗМІСТ

		с
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	11
1.1	Багатофункціональний тепловий насос	19
1.2	Теплонасосна установка	25
1.3	Автономна установка для опалення і гарячого водопостачання	28
1.4	Автономна система водяного опалення будівель	32
	Висновки до першого розділу	33
2	Розробка системи опалення з використанням теплового насоса	37
2.1	Загальні відомості	39
2.2	Вибір схеми теплонасосної установки	40
	Висновки до другого розділу	40
3	Розрахунки елементів системи опалення з використанням теплового насоса	40
3.1	Вихідні дані	41
3.2	Визначення питомих параметрів циклу	42
3.3	Визначення режимних параметрів теплонасосної установки	44
3.4	Розрахунок теплопритоків опалювального приміщення	53
3.5	Розрахунок компресора теплонасосної установки	63
3.6	Розрахунок регенеративного теплообмінника	73
3.7	Підбор допоміжного устаткування	74
	Висновки до третього розділу	

МРМА 23.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Марчук І.О.			Розробка системи опалення на основі теплового насоса		4	79
Перевір.		Гимошук О.І.						
П.контр.		Мундич С.І.				ХНУ, гр. ЕТМ-22-1		
Затвер.		Гимошук О.С.						

Крім того, корисна модель має промислову застосовність, оскільки може бути використана для теплопостачання споживачів і систем кондиціонування.

Повна функціональна схема пристрою наведена на рисунку 1.1..

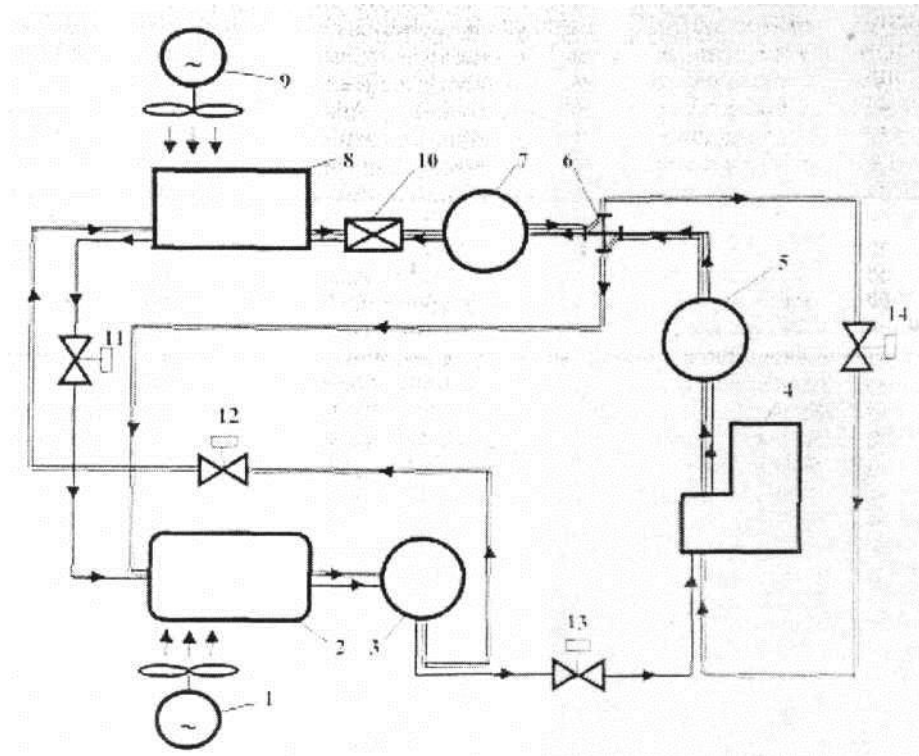


Рисунок 1.1 - Багатофункціональний тепловий насос

Багатофункціональний тепловий насос (далі МТН) складається з таких основних пристроїв:

- 2 збудники 1 і 9 (вентилятори);
- 2 конденсатори;
- Три теплообмінники 3, 5 і 7;
- Компресор 4;
- Електромагнітний клапан 6;
- Випарник 8;
- Дросель 10;

Основний цикл роботи БТХ у "зимовому" режимі полягає у виробленні тепла у випарнику 8 завдяки віджиму пари робочої рідини, стисненої компресором 4 і охолодженої теплообмінниками 5 і 7.

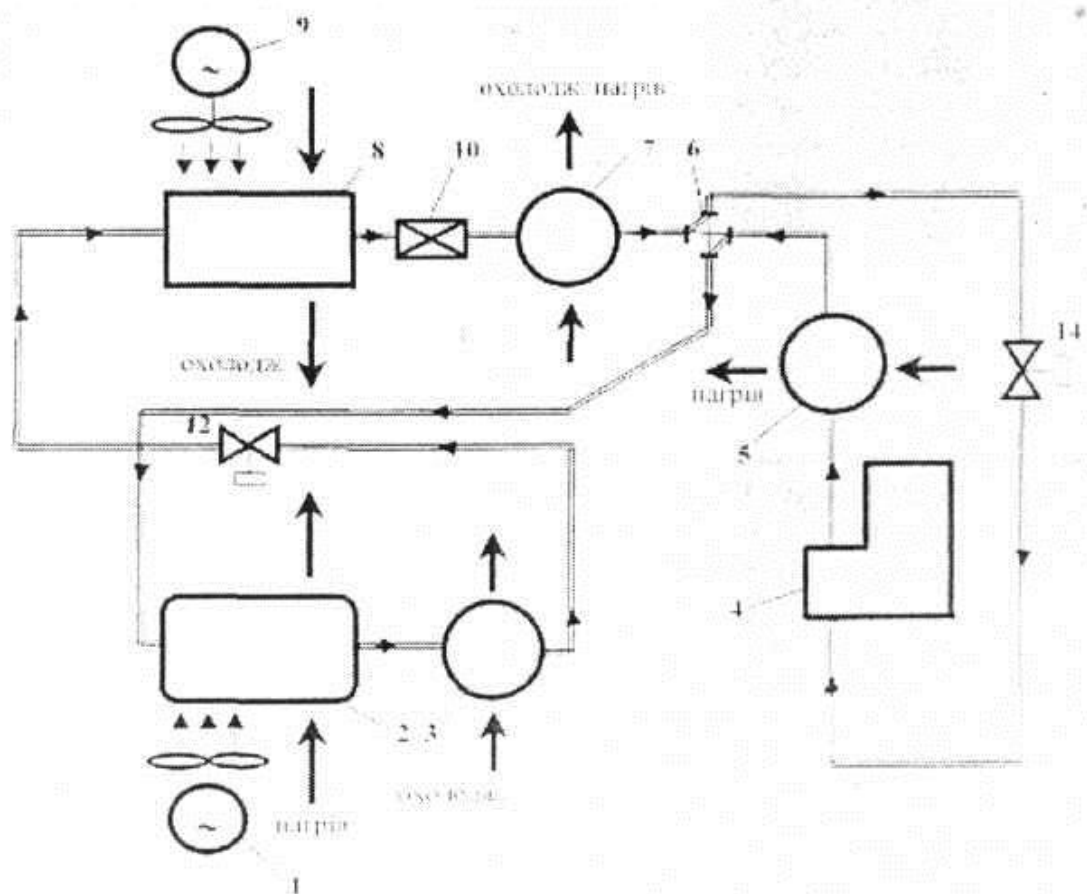


Рисунок 1.3 – Багатофункціональний тепловий насос у режимі «зима»

У цьому разі робоча рідина після теплообмінника 5 через перемикальний клапан 6 надходить у конденсатор 2 і теплообмінник 7 і виконує корисне завдання програмного нагріву.

У теплообміннику 3 пара робочої рідини нагрівається до температури, розрахованої на стиснення компресором 4, а теплообмінник 5 не змінює своєї функції.

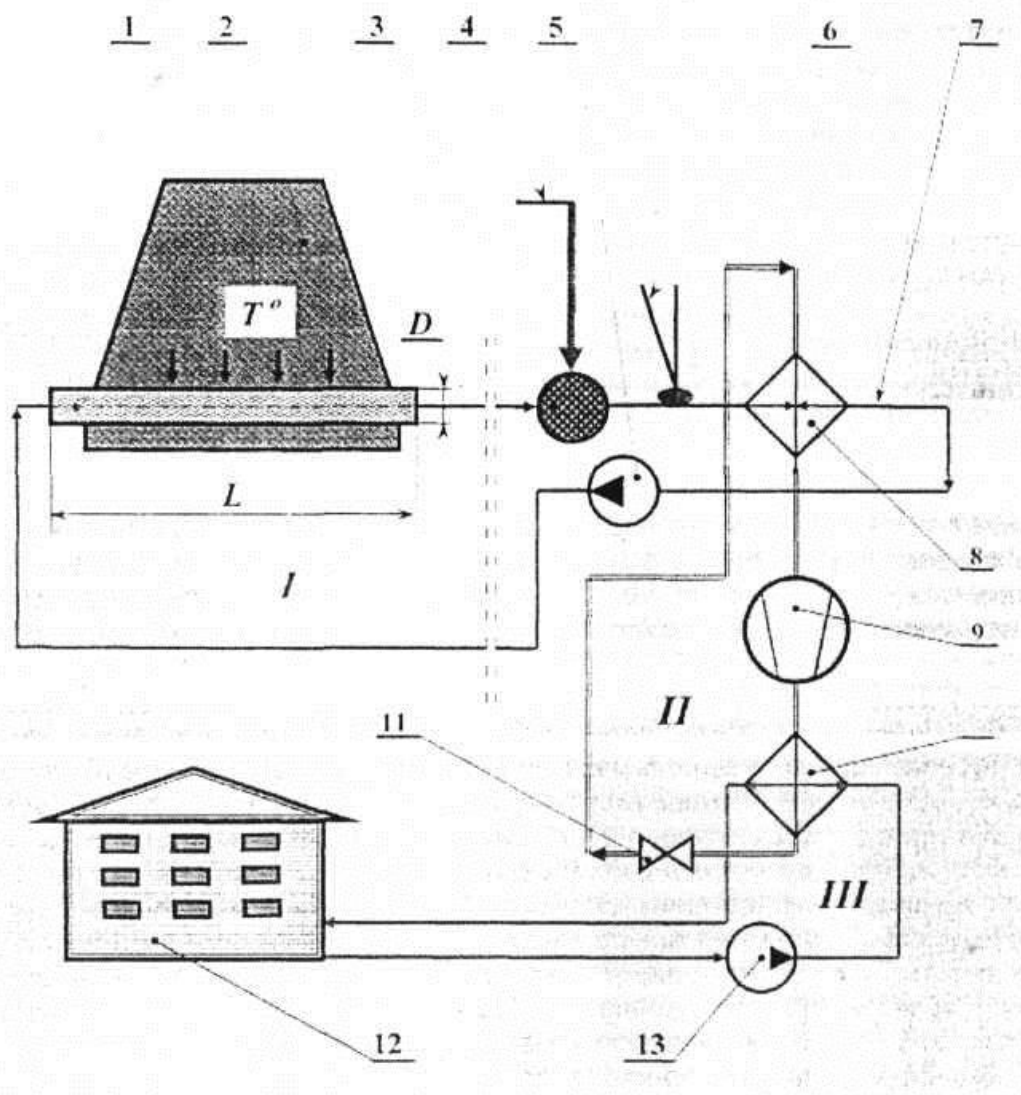


Рисунок 1.4 - Теплонасосна установка

У схемі I трубами 1, транспортним каналом 7 і контактним теплообмінником 3 на горизонтальній ділянці в нижній частині терикону 2, що обігрівается вогнем, за допомогою насоса 5 циркулює низькопотенційний теплоносій, що використовується, наприклад, як підігріта технологічна вода, знімаючи тепло з ґрунтової маси терикону 2. Рівень температури охолоджувальної води після контактного теплообмінника 3 контролюється температурними датчиками 6. Згідно з відомими класифікаціями, внутрішня температура T° загашеного нагрітого терикону становить понад 35°C , яка залишається стабільною протягом десятиліть. Це пов'язано з дуже високою

енергоємністю теплоакумулюючих властивостей терикону, що сягає від сотень тисяч до понад мільйона кубічних метрів, при цьому горючі матеріали становлять 15-30% від загального обсягу терикону. Така ситуація дає змогу транспортувати енергію низькопотенційного теплоносія на значну відстань від терикону 2 (на схемі позначено пунктирною лінією), тим самим максимально наближаючи контур робочого блоку II, тобто теплового насоса, до споживача теплової енергії 12. Транспортний трубопровід 7 нагрітої води з'єднаний з теплообмінником-випарником 8 контуру II, в якому циркулює робоча рідина - озонобезпечний фреон - під дією компресора 9. Під дією тепла, накопиченого у відвалі 2, що транспортується в теплообмінник-випарник 8, фреон випаровується, і його пари надходять у компресор 9, де їхній тиск і температура підвищуються. Гарячі пари фреону надходять у теплообмінник-конденсатор 10, де передають фазове тепло теплоносію (технічній воді) в контурі тепlopостачання III і конденсуються. Нагріта технічна вода спрямовується насосом 13 до споживача 12, де використовується для опалення та гарячого водопостачання. Потім фреони проходять через регулювальний дросель 11 і розгерметизуються до рівня, за якого вони випаровуються в теплообміннику-випарнику 8. Таким чином, фреони циркулюють у замкненому контурі II в різних фазах і переносять теплову енергію з контуру I в контур III. Максимальна ефективність перетворення енергії більшості сучасних парокомпресійних теплових насосів рекомендується в діапазоні температур 20-35°C. Якщо температура низькопотенційного теплоносія на вході в теплообмінник-випарник 8, контрольована датчиком 6, вища за заданий рівень, охолоджена вода з лінії 4 змішується з основним потоком низькопотенційного теплоносія в контактному теплообміннику 3 до рекомендованої температури. У холодну пору року витрата охолодженої води знижується або зовсім виключається з циклу. Задана температура погашеного нагрітого терикону T, розрахована, виходячи з його геометричних розмірів і

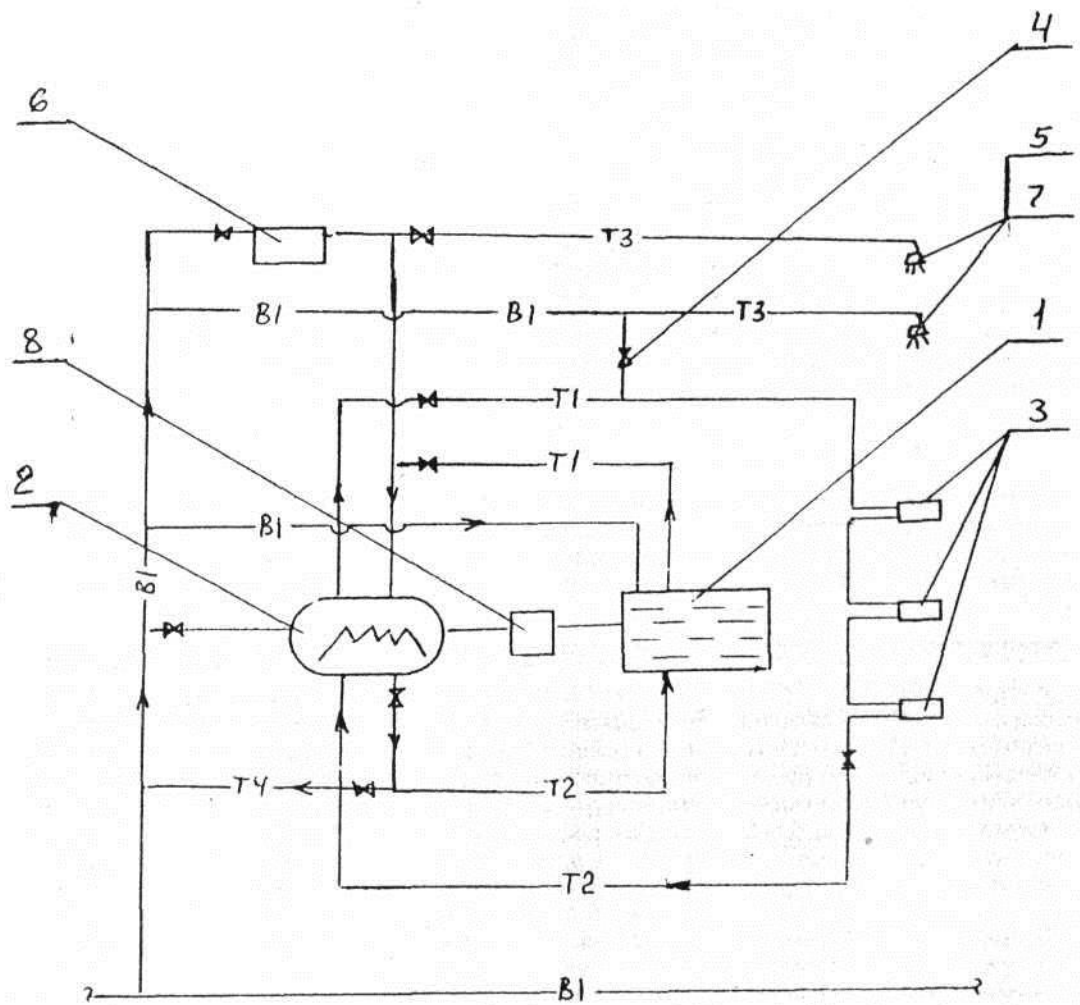


Рисунок 1.5 – Принципова схема роботи установки для опалення й горячого водопостачання

Система складається з безпальникового накопичувального котла 1, під'єданого до теплового насоса 2, тепловий насос 2 з'єднаний із системою опалення 3 і через перемичку 4 із системою горячого водопостачання 5. Тепловий насос 2 з'єднаний із сонячним водонагрівачем 6, який під'єднаний до системи горячого водопостачання, що складається з двох потоків 7 і 5. Потік 7 під'єднаний безпосередньо до сонячного водонагрівача 6, а потік 5 - до теплового насоса 2. Система встановлюється в підвалі будинку або в окремому приміщенні на першому поверсі.

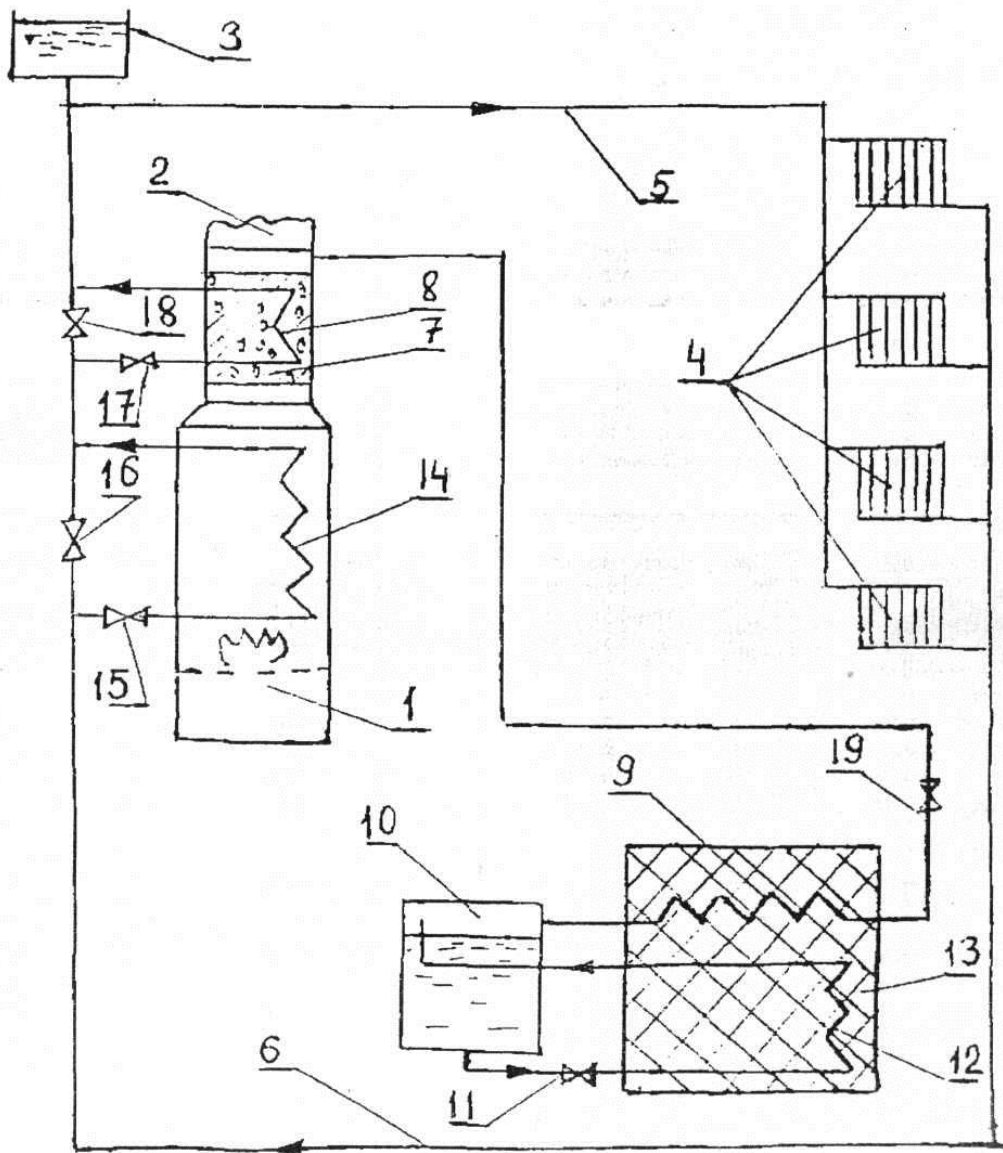


Рисунок 1.6 - Автономна система водяного опалення будівель

Автономна система водяного опалення будівель працює у двох режимах.

Режим 1: Під час спалювання палива в топці котла 1 відпрацьовані гази нагрівають зворотну воду системи опалення, яка подається лінією 6 на поверхню нагрівання 14. Нагріта вода через лінію 6 подається в систему опалення 4, яка забезпечує необхідне тепло в приміщенні. Охолоджена вода повертається в котел 1 через зворотну лінію 6. При цьому клапани 15 і 18

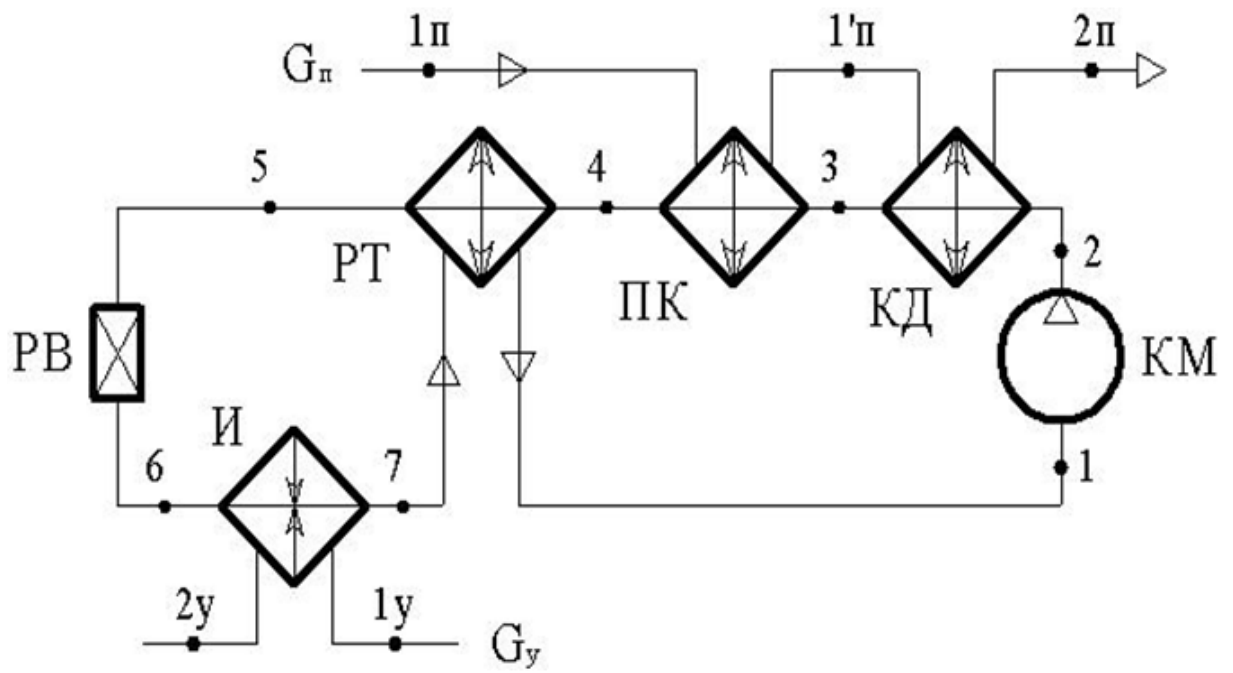
(електрична) енергія використовується для приводу компресора. За наявності більш-менш високотемпературного низькопотенційного джерела тепла кількість тепла, що передається споживачеві, у кілька разів перевищує витрату енергії на привід компресора. Відношення корисного тепла до роботи, необхідної для приводу компресора, називається коефіцієнтом перетворення теплового насоса, який у найпоширеніших системах теплових насосів досягає понад 3.

Як низькопотенційні джерела тепла можуть використовуватися підземні води, стічні води, річкова вода, морська вода, низькопотенційні джерела тепла від електростанцій і градирень. Теплові насоси особливо ефективні, коли ціни на паливо високі, а ціни на електроенергію відносно низькі. Так часто відбувається в багатьох європейських країнах, де більша частина електроенергії виробляється на атомних або гідроелектростанціях.

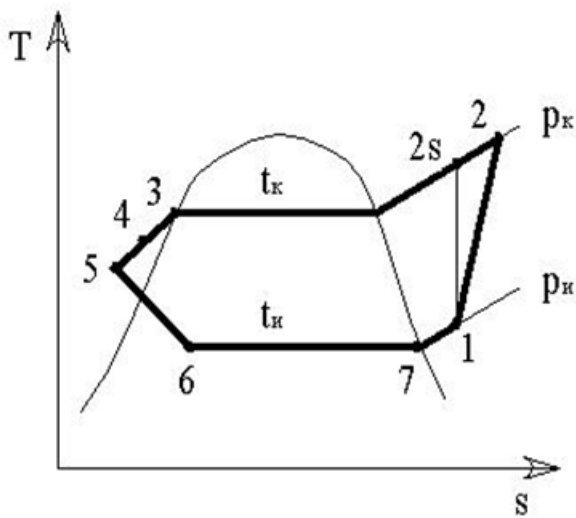
2.2 Вибір схеми теплонасосної установки

У теплонасосних установках (ТНУ) має використовуватися холодильний цикл із рекуперативним теплообмінником. У цій системі пара робочої рідини, що виходить із випарника (мастилоохолоджувача) у стані 7 (мал. 2.1), спрямовується до регенеративного теплообмінника, де нагрівається й одночасно охолоджується гарячішою робочою рідиною, яка виходить із конденсатора. У результаті регенерації підвищується ефективність установки.

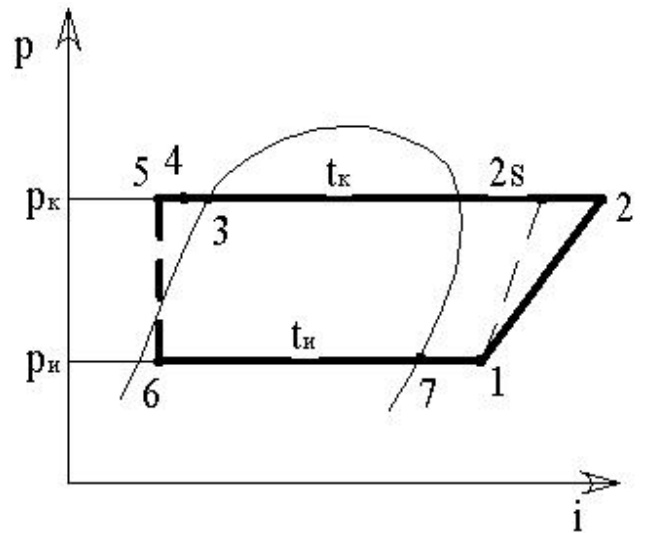
						36



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 - Схема ТНУ(а) і її цикл в T,s (б) і p,i (в)– діаграмах

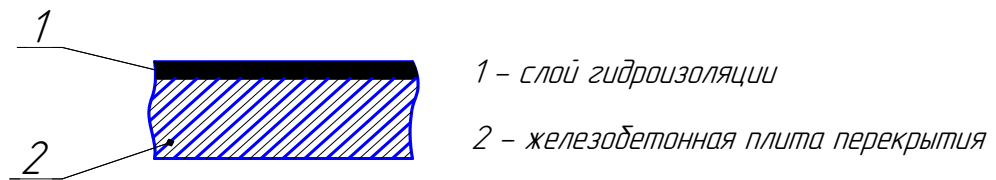


Рисунок 3.4 – Конструкція покриття

Для кожного матеріалу прийнято відповідні коефіцієнти теплопровідності й товщини:

$$\lambda_1 = 0,15 \text{ Вт/мК};$$

$$\delta_1 = 0,01 \text{ м};$$

$$\lambda_2 = 1,1 \text{ Вт/мК};$$

$$\delta_2 = 0,22 \text{ м}.$$

Для внутрішніх поверхонь стелі $\alpha_{вн} = 9,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Для зовнішніх поверхонь покриттів без даху $\alpha_n = 23,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Дійсний коефіцієнт тепловіддачі:

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1}{\frac{1}{23,2} + \frac{1}{9,28} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{0,22}{1,1}} = 2,4 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right) \quad (3.24)$$

3.4.5 Розрахунок товщини ізоляції для підлоги

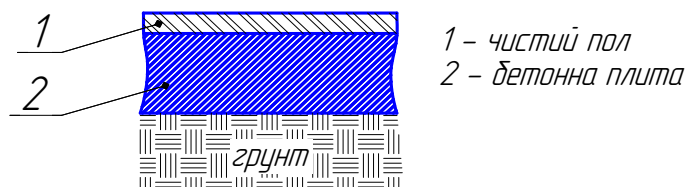


Рисунок 3.5 – Конструкція підлоги

перед всмоктуванням. Область обшивки ущільнюється спеціальною паранітовою прокладкою.

Ротор електродвигуна працює як маховик. Маховик - це накопичувач енергії поршневого компресора, що дає йому змогу долати інерцію механізму руху під час зупинки.

Вбудований шестерний масляний насос. Після масляного насоса масло подається до пар тертя через свердла вала і шатуна. Перед надходженням у масляний насос воно проходить через фільтр грубого очищення.

Як опорні підшипники використовуються дворядні шарикопідшипники.

3.5.2 Термодинамічний розрахунок холодильного компресора

Холодильний агент	R142
Охолодження циліндрів	парами холодильного агента
Виконання	безсальниковий
Холодопродуктивність	$Q_0=100$ кВт

Для робочого циклу визначаємо відношення тисків:

$$\pi_n = p_k / p_0 = 1,4 / 0,6 = 2.33. \quad (3.42)$$

Визначаємо питому масову холодопродуктивність:

$$q_0 = i_7 - i_6 = 444 - 274 = 170 \text{ кДж/кг}. \quad (3.43)$$

Визначаємо питому об'ємну холодопродуктивність:

$$q_v = \frac{q_0}{\nu_1} = \frac{170}{0,046} = 3695.7 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}. \quad (3.44)$$

Тоді $\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_{др} \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{пл} = 0,935 \cdot 0,911 \cdot 0,9 \cdot 0,987 = 0,757$.

Визначаємо фактичний об'єм компресора.:

$$V_d = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{100}{3695.7} = 0,027 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (3.51)$$

Знаходимо теоретичну об'ємну продуктивність компресора:

$$V_T = \frac{V_d}{\lambda} = \frac{0,027}{0,757} = 0,0357 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (3.52)$$

Для робочих циклів продуктивність двигуна визначається таким чином:

Для поршневих фреонових компресорів без крейцкопфа зазначений ККД приймається рівним від 0,71 до 0,84.

Приймання:

Адіабатична потужність компресора визначається за таким рівнянням:

$$N_{ад} = M_a \cdot i_{ц} = \frac{Q_0}{q_0} \cdot (i_2 - i_1) = \frac{100}{170} \cdot (484 - 454) = 29.4 \text{ кВт} \quad (3.53)$$

$$N_i = \frac{N_{ад}}{\eta_i} = \frac{29.4}{0,82} = 35.9 \text{ кВт} \quad (3.54)$$

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_{мех}} = \frac{35.9}{0,95} = 37.8 \text{ кВт} \quad (3.55)$$

$$N_{эд} = \frac{N_e}{\eta_{пер} \cdot \eta_{дв}} = \frac{37.8}{0,97 \cdot 0,79} = 49.3 \text{ кВт}. \quad (3.56)$$

3.5.3 Визначення геометричних розмірів

Приймаємо вертикальну дворядну схему компресора.

Для непрямочних машин прийmemo величину $\psi = 0,75$. Значення середньої швидкості поршня c_m для безкрейцкопфних поршневих компресорів повинна лежати в межах від 2,5 до 4,5 м/с. Хід поршня приймаємо $S = 82$ мм й частоту обертання коленвала $n = 24$ об/с, тоді:

$$c_m = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 0,082 \cdot 24 = 3,936 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.57)$$

Визначаємо діаметр поршня щабля:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_T}{\pi \cdot S \cdot i \cdot n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0357}{3,14 \cdot 0,082 \cdot 2 \cdot 24}} = 0,1075 \text{ м} \quad (3.58)$$

Приймаємо $D = 110$ мм.

Уточнюємо значення ψ :

$$\psi = \frac{S}{D} = \frac{82}{110} = 0,745 \quad (3.59)$$

Задаємося величиною:

$$\lambda_R = \frac{R}{L} = \frac{S}{2L} = 0,2,$$

$$L = \frac{S}{0,4} = \frac{82}{0,4} = 205 \text{ мм}$$

Приблизно діаметр шийки колінвала, виготовленого зі сталі 40X, можна визначити по формулі:

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{кр}}{0,2 \cdot \tau_{кр}}} \quad (3.60)$$

Крутний момент можна знайти по формулі:

$$M_{кр} = 9555 \cdot \frac{N_{\epsilon}}{n} = 9555 \cdot \frac{37,8}{24 \cdot 60} = 250,82 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.61)$$

Для сталі 40X, вид термообробки поліпшення, припустимо дотичне напруження становить $[\tau] = 900 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 8,82 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Звідси можна знайти дотичне напруження при крутінні:

$$\tau_{кр} = \frac{[\tau]}{k} = \frac{8,82 \cdot 10^7}{2,5} = 3,53 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (3.62)$$

де k - коефіцієнт запасу міцності, ($k = 2 \dots 3$).

Підставимо ці значення у вираження для діаметра корінної шийки d :

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{кр}}{0,2 \cdot \tau_{кр}}} = \sqrt[3]{\frac{250,82}{0,2 \cdot 3,53 \cdot 10^7}} = 0,033 \text{ м} \quad (3.63)$$

Приймаємо $d = 40 \text{ мм}$.

Діаметр шийки колінвала:

$$d_{ш} = (0,8 \dots 1,0) \cdot d = 0,9 \cdot 40 = 36 \text{ мм} \quad (3.64)$$

$$\omega_{\text{ж}} = \frac{G}{\rho_{\text{ж}} \cdot F_{\text{зм}}} = \frac{0,36}{1041 \cdot 9,1 \cdot 10^{-4}} = 0,38 \text{ м/с} \quad (3.87)$$

Знаходимо критерії Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{\omega_{\text{ж}} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{0,38 \cdot 0,034}{0,195 \cdot 10^{-6}} = 66256. \quad (3.88)$$

Знаходимо радіус закруглення змійовика по осьовій лінії труби сердечника:

$$R_{\text{зм}} = 0,5D_{\text{сн}} + S + 0,5 d_{\text{н}} = 0,5 \cdot 0,219 + 0,004 + 0,5 \cdot 0,038 = 0,1325 \text{ м.} \quad (3.89)$$

Критичне число Рейнольдса, що відповідаючого ламінарному режиму плин у трубці змійовика, дорівнює:

$$\text{Re}_{\text{кр.лам}} = \frac{16,4}{\sqrt{d_{\text{вн}}/R_{\text{зм}}}} = \frac{16,4}{\sqrt{0,034/0,1325}} = 32,35. \quad (3.90)$$

Критичне число Рейнольдса, що відповідаю чого турбулентному режиму плин у трубці змійовика дорівнює:

$$\text{Re}_{\text{кр.турб}} = 18500 \left(\frac{d_{\text{вн}}}{2R_{\text{зм}}} \right)^{0,28} = 18500 \left(\frac{0,034}{2 \cdot 0,1325} \right)^{0,28} = 10400. \quad (3.91)$$

Вивід: $\text{Re}_{\text{ж}} > \text{Re}_{\text{кр.турб}}$, тобто режим руху в трубці змійовика турбулентний.

Число Прандтля дорівнює:

$$\text{Pr}_{\text{ж}} = \frac{\nu_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot c_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{ж}}} = \frac{0,195 \cdot 10^{-6} \cdot 1041 \cdot 989,7}{0,0686} = 2,93. \quad (3.92)$$

