

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
УКРАЇНИ ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.3 (477.41)

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор Навчально-наукового  
інституту енергетики, автоматики  
і енергозбереження  
(назва ННІ)

\_\_\_\_\_  
(підпис) **Віктор КАПЛУН**  
(ПІБ)  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_ р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
інженерії енергосистем

\_\_\_\_\_  
(підпис) **Євген АНТИПОВ**  
(ПІБ)  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_ р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему

Розробка енергоефективної системи теплопостачання  
ВСП НУБіП України „Агрономічна дослідна станція”  
на базі ґрунтових теплових насосів

Спеціальність

\_\_\_\_\_  
**144 – «Теплоенергетика»**  
(код і назва)

Освітня програма

\_\_\_\_\_  
**Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент**  
(назва)

Орієнтація освітньої  
програми

\_\_\_\_\_  
**освітньо-професійна**  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) \_\_\_\_\_  
(підпис) **Горобець В.Г.**  
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) \_\_\_\_\_  
(підпис) **Шеліманова О.В.**  
(ПІБ)

Виконав

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_  
(ПІБ студента) **Гриценюк І.О.**

**КИЇВ – 2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
УКРАЇНИ ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри інженерії енергосистем

Є.О.Антипов

канд.техн.наук. доцент

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“ ” 20 року

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Гриценюку Ігорю Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

144 – «Теплоенергетика»

(код і назва)

Освітня програма

Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент

(назва)

Орієнтація освітньої

програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Розробка енергоефективної системи тепlopостачання ВСП НУБіП України „Агрономічна дослідна станція” на базі ґрунтових теплових насосів

Затверджена наказом проректора НУБіП України від “ 19 ” 12 2023 р.№ 2334 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру

25.11.2024 р.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Предмет проектування та основні задачі магістерської роботи
2. Теплонасосні джерела тепlopостачання
3. Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою
4. Ефективність теплонасосних установок
5. Розрахунок та вибір теплонасосної установки житлового будинку

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання “ 20 ” 12 2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Шеліманова О.В.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Гриценюк І.О.

(прізвище та ініціали студента)

## ЗМІСТ

	Стор.
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, термінів .....	4
Вступ .....	6
1. Предмет проєктування та основні задачі магістерської роботи ....	8
1.1 Загальні дані фермерського господарства.....	8
1.2 Характеристика об'єкту проєктування.....	11
1.3 Мета та задачі магістерської роботи .....	13
2 Теплонасосні джерела теплопостачання.....	15
2.1 Застосування ТНУ в світовій практиці.....	16
2.2 Теплонасосні станції в системах теплопостачання.....	26
3 Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою.....	32
3.1 Сфери застосування теплонасосних установок.....	32
3.2 Структура узагальненої теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою .....	36
4 Ефективність теплонасосних установок.....	47
4.1 Ефективність застосування ТНУ з електроприводом компресора на теплонасосних станціях.....	47
4.2 Ефективність застосування ТНУ з дизельним приводом компресора на теплонасосних станціях.....	53
5 Розрахунок та вибір теплонасосної установки житлового будинку .....	60
5.1 Загальні положення із забезпечення теплоізоляційних і експлуатаційних показників будівельних виробів.....	60
5.2 Визначення теплової потужності об'єкту проєктування.....	63
5.3 Вибір теплового насосу.....	74
5.4 Розрахунок строку окупності впровадження теплового насосу.....	77
Висновки .....	79
Список використаних джерел .....	82

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,  
ОДИНИЦЬ, ТЕРМІНІВ**

$h$  – питома ентальпія, кДж/кг;

$l$  – питома робота, кДж/кг;  $q$  – питома теплота, кДж/кг;

$t$  – температура, °С;

$V$  – витрата палива, кг/с; м<sup>3</sup>/с;

$C$  – питома теплоємність, кДж/(кг·°С);

$G$  – масова витрата, кг/с;

$N$  – електрична потужність, МВт;

$Q$  – теплова потужність, МВт;

$Q_n^p$  – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{ny}^p$  – нижча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;

$T$  – температура, К;

$T_{cp}$  – середньотермодинамічна температура теплоносія у випарнику, К;

$\beta$  – частка теплової потужності ТНУ у складі ТНС;

$\varepsilon$  – холодильний коефіцієнт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії (ККД);

$\eta$  – ККД-нетто котельні;

$\lambda, \pi$  – міра підвищення тиску в компресорі;

$\varphi$  – коефіцієнт перетворення (опалювальний коефіцієнт).

ГТУ – газотурбінна установка;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

ДНТ – джерела низькотемпературної теплоти;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ТН – тепловий насос;

ТНУ – теплонасосна установка;

ТНС – теплонасосна станція;

#### Індекси:

а – адіабатний; в – випаровування; вип – випарник; вг – відхідні гази; від – відведена теплота; відп – відпущена теплота; вк – водогрійний котел; г – гази; гту – газотурбінна установка; д – двигун; е – ексергетичний; ед – електродвигун; ем – електромеханічний; ес – електрична станція; еф – ефективний; заг – загальна; змв – зворотна мережева вода; к – конденсація; кз – камера згорання; км – компресор; конд – конденсатор; кор – корисна; кот – котельна; мв – мережева вода; нс – навколишнє середовище; нт – низькотемпературне джерело теплоти; о – оборотний; оі – відносний внутрішній; ох – система охолодження; п, пал – паливо; пв – повітря; підв – підведена; пмв – пряма мережева вода; р – робочий; см – суміш; ср – середній; тн – тепловий насос; тну – теплонасосна установка; тнс – теплонасосна станція; топ – топка; то,т – теплообмінник; тс – теплові споживачі; у – умовне паливо; ут – утилізатор; ха – холодоагент; ц – цикл.

## ВСТУП

В наш час, коли економія паливно-енергетичних ресурсів і охорона навколишнього середовища набувають все більш пріоритетного значення, задача підвищення енергоефективності тепло технологічних систем стає особливо актуальною. Одним із засобів економії органічного палива в таких системах є впровадження теплонасосних установок (ТНУ). На сучасному етапі розвитку науки теплові насоси є майже єдиним засобом для енергетичного використання скидної низькотемпературної теплоти.

ТНУ є корисними в екологічному плані. Відсутність в теплових насосах процесу горіння приводить до зменшення забруднення повітряного басейну. Утилізація в ТНУ низькотемпературних теплових відходів є одним з ефективних напрямків захисту біосфери від теплового забруднення.

Технологія теплопостачання з використанням теплових насосів застосовується практично в усіх розвинених країнах світу. Всі широкомасштабні програми з енергозбереження, що реалізуються за кордоном, передбачають їх широке впровадження. Необхідність робіт зі створення і широкого впровадження теплових насосів знаходить все більше визнання.

В Україні значного впровадження ТНУ в теплоенергетичну галузь не спостерігається. Роботи з впровадження ТНУ перебувають, в основному, на стадії окремих досліджень. До факторів, які на теперішній час стимулюють впровадження ТНУ в промисловість і муніципальну енергетику слід віднести дефіцит паливних ресурсів, а також екологічні переваги ТНУ в порівнянні з альтернативними низькотемпературними джерелами теплопостачання. Для тепло технологічних систем підприємств України недостатніми є системні дослідження умов теплопостачання цих підприємств з використанням теплових насосів.

Таким чином, проведення досліджень з підвищення енергоефективності джерел тепlopостачання з використанням ТНУ, а також моделювання реальної роботи теплонасосних установок в системах тепlopостачання є актуальним.

З метою підвищення енергоефективності джерел тепlopостачання необхідно: визначення умов раціонального комбінування джерел тепlopостачання і теплонасосних установок в системах тепlopостачання з урахуванням комплексного впливу типу приводу компресора ТНУ, схемних рішень, режимів роботи та розробка методичних основ синтезу джерел тепlopостачання з тепловими насосами.

# РОЗДІЛ 1

## ПРЕДМЕТ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ

### МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

#### 1.1. Загальні дані об'єкту проектування

Історія Агрономічної дослідної станції бере свій початок від радгоспу “Митниця” Саливонківського цукрокомбінату, який був організований в 1921 році. Постановою Кабінету Міністрів України від 01.06.1995 року №387 “Про Національний аграрний університеті та наказом Мінсільгосппроду України від 29.06.1995 року №157 Агрономічна дослідна станція передана в пряме підпорядкування Національному аграрному університету.

Підприємство спеціалізоване на виробництві молока, м'яса, зернових та технічних культур. Площа сільськогосподарських угідь 1056,2 га в тому числі ріллі 934,2 га.

Агростанція займає вигідне економічне і географічне положення. На відстані 3 км проходить автомагістраль обласного значення, яка зв'язує Агростанцію з районним центром м. Васильків та обласним центром м. Києвом. Відстань до районного центру 28 км, а до обласного 54 км.

Підприємство має в розпорядженні майстерні, гараж, житлові будинки, тваринницькі приміщення та інші необхідні для господарювання споруди.

Рослинництво обслуговує тракторно-польова бригада, а також автопарк, реммайстерня, будівельна бригада, столова. Однією з найважливіших культур, що вирощуються в господарстві, є озима пшениця. З технічних □ цукрові буряки

Темпи росту і розвитку рослин, урожай і якість сільськогосподарських культур в значній мірі залежать від метеорологічних умов. Кліматичні умови в Обухівському районі Київської області є сприятливими для вирощування багатьох сільськогосподарських культур,

Територія району має нахил в напрямі з півдня на північ та з заходу на схід. Завдяки цьому географічна широта не впливає на ріст температур з півночі на південь. Температура в південній частині області знижується за рахунок підвищення висоти поверхні над рівнем моря.

Обухівський район знаходиться на території помірно-теплого, помірно-зволоженого агрокліматичного підрайону Київської області. Сума активних температур складає 25 °С. Останні весняні заморозки закінчуються в кінці травня, а перші осінні починаються в кінці вересня. Вегетаційний період рослин з температурою вище +5 °С складає 215 днів.

Рельєф території – слабкохвиляста рівнина з незначними пониженнями. Рельєф поверхні впливає на розподіл опадів та нагрівання ґрунту, що, в свою чергу, відбивається на розвитку рослин.

Основну частину в складі ґрунтів займають чорноземи звичайні - біля 47%, чорноземи лучні - 20%, також маємо в складі ґрунтів лучно-чорноземні та чорноземи опідзолені. Чорноземи лучні; характеризуються наявністю карбонатів, лінія яких змінюється від поверхні до 1,2-2,5 м в залежності від умов зволоження, що значною мірою впливає на фосфатний режим ґрунтів. Чорноземи звичайні та чорноземи лучні мають високу забезпеченість по азоту та фосфору і середню та низьку по калію (по Мачигіну). Вміст гумусу 4-8 %. Реакція водної витяжки близька до нейтральної, що забезпечує сприятливі умови для росту і розвитку більшості культур

Ґрунтові води на території залягають неглибоко і у вологі роки по капілярам досягають верхніх горизонтів ґрунту. В посушливі роки рівень ґрунтових вод знижується, внаслідок чого повітряно-водний режим наближається до чорноземів плато.

На території даного господарства знаходяться наступні будівлі:

Корівник на 200 голів з прибудованим молочним блоком. Зовнішні стіни будівлі – залізобетон, фундамент – набивні палі, перекриття – залізобетон, крівля – листи азбестоцементу. Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 1380 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 752 м<sup>2</sup>.

Телятник для новонароджених на 200 голів. Зовнішні стіни будівлі – ракушняк, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, крівля – листи азбестоцементу. Тип перекриття – двоскатна покрівля. Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 2461 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 1012 м<sup>2</sup>.

Телятник місткістю 360 голів. Зовнішні стіни будівлі – залізобетон, фундамент – набивні палі, перекриття – залізобетон, покрівля – листи азбестоцементу. Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 1380 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 752 м<sup>2</sup>.

Телятник місткістю 200 голів. Зовнішні стіни будівлі – ракушняк, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, крівля – листи азбестоцементу. Тип крівлі – двоскатна. Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 2335 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 812 м<sup>2</sup>.

Свинарник-відгодівельник на 400 голів. Зовнішні стіни будівлі – ракушняк, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, крівля – листи азбестоцементу. Тип покрівлі - двоскатна Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 2148 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 716 м<sup>2</sup>.

Свинарник для поросят-від'ємишів місткістю 400 голів. Зовнішні стіни будівлі – ракушняк, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, покрівля – листи азбестоцементу. Тип покрівлі – двоскатна Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами становить 2148 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 716 м<sup>2</sup>.

Бойня. Зовнішні стіни будівлі – цегла, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, покрівля – листи азбестоцементу. Тип покрівлі – зміщена. Об'єм

приміщення за зовнішніми обмірами становить 120 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 30 м<sup>2</sup>.

Кормоцех. Зовнішні стіни будівлі – цегла, фундамент – бутовий, перекриття – залізобетон, покрівля – листи азбестоцементу. Тип крівлі – двоскатна. Об'єм приміщення за зовнішніми обмірами 2148 м<sup>3</sup>. Загальна площа приміщення становить 407 м<sup>2</sup>.

Також на території розміщено такі будівлі: пункт технічного обслуговування, сховище, ветеринарна аптека і санпропускник, накриття для сінажу та одноповерховий житловий будинок площею 78 м<sup>2</sup>.

## **1.2. Характеристика об'єкту проєктування**

Об'єктом проєктування кваліфікаційної магістерської роботи є житловий одноповерховий житловий будинок площею 78 м<sup>2</sup>, який розташований на території фермерського господарства.

План розташування приміщень будівлі показано на рис. 1.1

При проєктуванні теплоізоляційної оболонки будинку на основі багатошарових конструкцій, треба розташовувати з внутрішньої сторони конструкцій шари з матеріалів, що мають більш високу теплопровідність, теплоємність та опір паропроникненню.

При проєктуванні нових будинків та реконструкції існуючих шари з теплоізоляційних матеріалів слід розташовувати з зовнішньої сторони огорожувальної конструкції, використовуючи при цьому системи фасадні теплоізоляційно-опоряджувальні (далі – СФТО).

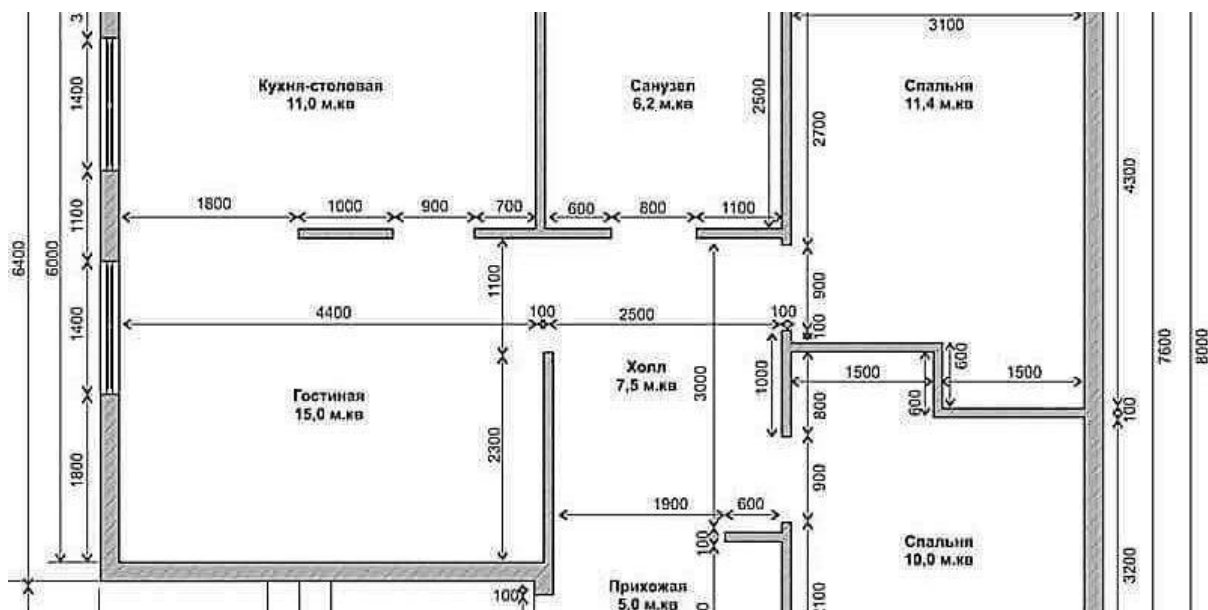


Рис.1.1. План розташування приміщень будівлі

Не рекомендується застосовувати конструктивні рішення з шарами із теплоізоляційних матеріалів з внутрішньої сторони конструкції через можливе надмірне накопичення вологи в теплоізоляційному шарі, що призводить до незадовільного тепловологісного стану конструкції й приміщення в цілому, а також до зниження теплової надійності оболонки будинку.

При проектуванні теплоізоляційної оболонки будинку з використанням термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій для зменшення термічної неоднорідності в площині фасаду будинку необхідно забезпечувати щільне прилягання теплоізоляційних матеріалів до теплопровідних включень – колон, балок, перемичок, внутрішніх перегородок, вентиляційних каналів тощо, і передбачати заходи відповідного контролю. Ненаскрізнi теплопровідні включення слід розташовувати ближче до теплої сторони огороження. Наскрізнi, головним чином, металеві включення (профілі, стрижні, болти) мають бути ізольовані матеріалами з теплопровідністю не більше  $0,35 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Під час проектування будинків треба передбачати захист внутрішніх поверхонь стін від впливу вологи, зовнішніх – від атмосферних опадів з використанням опоряджувально-захисних шарів покриття (облицювання,

штукатурки, фарбування), які вибираються залежно від матеріалу стін, їх конструктивного рішення та умов експлуатації. Огороджувальні конструкції, що контактують з ґрунтом, необхідно захищати від ґрунтової вологи шляхом розміщення в стінах (зовнішніх і внутрішніх) вище вимощення будинку, а також нижче рівня підлоги цокольного чи підвального поверхів горизонтальної гідроізоляції, а в підземній частині стін – вертикальної гідроізоляції.

Проектування теплоізоляційної оболонки будинків треба здійснювати з застосуванням теплоізоляційних матеріалів, термін ефективної експлуатації яких складає не менше ніж 25 років; для змінних ущільнювачів - з терміном ефективної експлуатації не менше ніж 15 років, з забезпеченням ремонтпридатності елементів теплоізоляційної оболонки. В конструкціях СФТО повинні застосовуватися теплоізоляційні матеріали з терміном ефективної експлуатації не менше розрахункового терміну експлуатації системи. В проектній документації слід передбачати перевірку теплоізоляційних властивостей огороджувальних конструкцій після терміну експлуатації, що дорівнює ефективному (розрахунковому) терміну служби, з подальшою розробкою конструктивних заходів із забезпечення необхідних теплоізоляційних властивостей оболонки будинку, а також наводити дані про ефективний термін експлуатації теплоізоляційних матеріалів, що застосовуються.

### **1.3. Мета та задачі магістерської роботи**

Магістерська робота присвячена питанню підвищення ефективності системи тепlopостачання фермерського господарства

Метою роботи є розробка системи тепlopостачання житлової будівлі бази ґрунтових теплових насосів .

Основні задачі магістерської роботи:

1. Провести аналіз узагальненої теплотехнологічної системи опалення з теплонасосною установкою.
2. Проаналізувати питання ефективності теплонасосних станцій
3. Розрахувати та вибрати тепловий насос для об'єкту проектування магістерської роботи
4. Визначити строк окупності впровадження теплового насосу

## РОЗДІЛ 2

### ТЕПЛОНАСОСНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Принцип дії теплонасосної установки (ТНУ) полягає в здійсненні зворотного термодинамічного циклу легкокиплячою речовиною (холодоагентом). У випарнику ТНУ (рис. 2.1) теплота від низькотемпературного джерела поглинається холодоагентом (ХА), який випаровується.

Пара ХА стискається в компресорі, завдяки чому її температура підвищується. Теплота від стиснутого (гарячого) ХА віддається споживачу в теплообміннику – конденсаторі, а сконденсована пара ХА після зниження тиску в дросельному вентилі знов надходить у випарник.

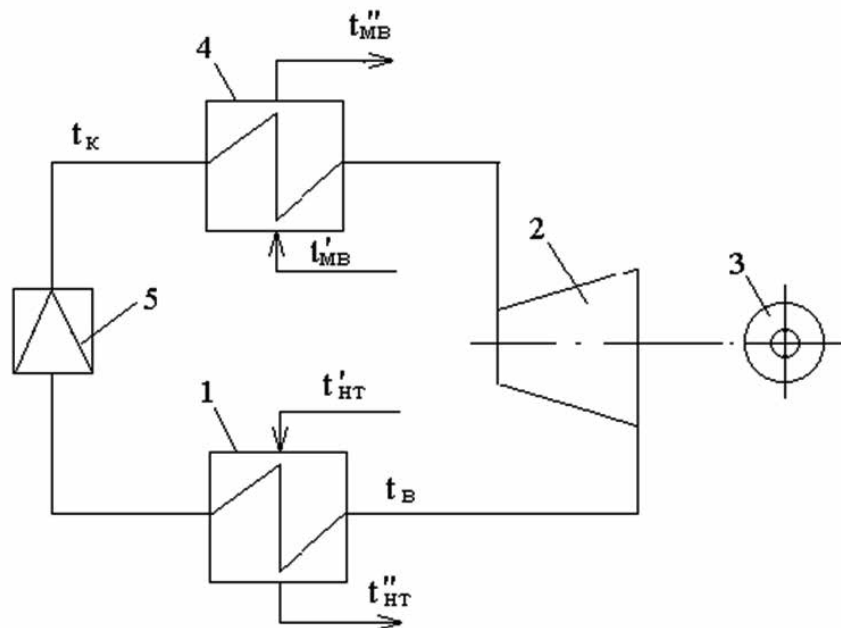


Рис. 2.1. Схема парокомпресійної ТНУ:

1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – дросель

Таким чином, сприйнята у випарнику низькотемпературна енергія  $q_v$  завдяки підведеній в компресорі механічній роботі  $l_{км}$  перетворюється на високотемпературну енергію, яка віддається споживачам в конденсаторі ТНУ:

$$q_k = q_b + l_{km} \quad (2.1)$$

Коефіцієнт перетворення енергії в ТНУ визначається з формули:

$$\varphi = \frac{q_k}{l_{km}} = \frac{(q_b + l_{km})}{l_{km}} = \varepsilon + 1 > 1, \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon = q_b / l_{km}$  – холодильний коефіцієнт.

Формула (2.2) відображає той факт, що енергія, яка віддається споживачу, більша за енергію, яка витрачена на цикл –  $l_{km}$ . Отже, використання низькотемпературної (скидної) енергії в ТНУ дає змогу економити енергоресурси.

## 2.1. Застосування ТНУ в світовій практиці

Завдяки раціональному використанню (перетворенню) енергії в ТНУ досягається економія паливно-енергетичних ресурсів. Тут для отримання низькотемпературної енергії (70–150 °С) не спалюється органічне паливо, як в котлах, а використовується скидна енергія (10–30 °С) і електрична енергія. Відсутність процесів горіння в ТНУ знижує забруднення навколишнього середовища. Крім того, утилізація низькотемпературних відходів, масштаби яких зростають пропорційно енергоспоживанню, являє собою один з найефективніших засобів захисту біосфери від теплових забруднень. На сучасному етапі ТНУ є практично єдиним засобом для використання скидної низькотемпературної енергії.

Теплонасосні установки використовуються вже майже століття. За цей час їх впровадження зазнало як підйомів, так і спадів. Огляд застосування ТНУ в світовій практиці наведено в [3 – 5]. Можна виділити чотири основних періоди розвитку ТНУ:

1927 – 1946 рр. – створення, головним чином, експериментальних та, в

більшості, неекономічних установок;

1947 – 1962 рр. – розробка, масове виробництво та широке впровадження реверсивних теплових насосів – цілорічних кондиціонерів;

1963 – 1971 рр. – різкий спад попиту, аж до того, що в Європі теплові насоси виявились майже забутими.

1972 рік та до теперішнього часу – відродження інтересу до теплових насосів та різке зростання досліджень в усьому світі.

Перша парокомпресійна холодильна машина, з використанням етилового ефіру як робочого тіла, була побудована в 1834 році Дж. Перкінсом; вона вже складалася з основних елементів сучасних парокомпресійних машин (випарник, компресор, конденсатор, дросельний вентиль) [11]. Створення аміачної холодильної машини у 70-х роках ХІХ століття зумовило початок холодильного машинобудування. Ідею застосування холодильних машин з метою нагріву, а саме для опалення будівель, висунув інший основоположник термодинаміки, видатний англійський фізик У. Томсон (лорд Кельвін) в 1852 р. [11].

Однак реалізація ідеї Томсона затягнулась майже на 80 років. Радянський фізик професор В. А. Міхельсон першим докладно розробив питання застосування парокомпресійних холодильних машин для опалення, яке він назвав динамічним [11]. Зростаючий дефіцит паливно-енергетичного балансу змушує приділяти цьому питанню все більше уваги.

Перша опалювальна установка на базі холодильної машини була споруджена в 1927 році англійським інженером Холдейном у власному будинку в Шотландії [11]. З початку 30-х років дослідні ТНУ стали будуватись не тільки у Великобританії та США, а також у Швейцарії, Італії, Японії.

Другий період найбільш характерний для США та Японії. В США в 1952 році було розпочато промислове виробництво компактних реверсивних повітряно-повітряних теплових насосів. До 1963 року їх випуск збільшився з однієї тисячі до 76 тисяч одиниць за рік.

Третій період в історії практичного застосування ТНУ розпочався різким зниженням попиту, а потім і застоєм виробництва теплових насосів у США. Річний випуск теплових насосів (ТН) з 1963 по 1971 роки практично не збільшився (76 та 82 тис. одиниць за рік відповідно) [3]. Це також вплинуло на відношення до теплових насосів у Західній Європі.

Четвертий, сучасний період розвитку ТНУ характерний активізацією робіт у всьому світі. Про це свідчать дані Комітету з теплових насосів МІРЕК, який був заснований в 1976 році (тепер він перетворений у Комітет з централізованого теплопостачання і теплових насосів) [3].

Поштовхом до відродження робіт з теплових насосів була на початку 70-х років напруженість паливно-енергетичного балансу в найбільш розвинених країнах, яка зв'язана з енергетичною кризою 1973 року та різким збільшенням на світовому ринку цін на паливо.

Стало зрозумілим, що економічно доступні ресурси органічного палива далеко не безмежні. Були терміново розроблені державні програми економії енергоресурсів, які передбачали значне збільшення капіталовкладень на розвиток ТНУ. В програмах вказується на те, що економія енергоресурсів дозволить не тільки зберегти органічне паливо, але й значно зменшити забруднення навколишнього середовища; відзначається, що економити енергію дешевше, ніж виробляти [3].

В останні роки в багатьох країнах світу велика увага приділяється створенню та впровадженню теплових насосів, призначених для опалення, вентиляції, гарячого водопостачання, сушки, дистиляції і т.п.

Особливий інтерес до неї визначається поширенням згаданих споживачів і значними масштабами можливої економії енергоресурсів [4].

Не менш важливим фактором є універсальність ТН як генераторів теплоти. Вони можуть використовуватись як різні підігрівники; підігрівники та охолодники одночасно або послідовно (наприклад, для нагріву повітря приміщень взимку і охолодження влітку); можуть мати електричний (від ТЕС,

АЕС, ГЕС та інших електростанцій) чи тепловий (газовий або рідкопаливний ДВЗ, турбіна) привод [14–19].

Теплопродуктивність ТН змінюється від декілька сот ват до десятків мегават. Теплові насоси дозволяють утилізувати низькотемпературну енергію практично будь-яких промислових або побутових теплових викидів [12–13]. Залучення останніх у тепловий баланс дозволить не тільки зменшити витрати первинної енергії на виробництво теплоти, але і знизити забруднення навколишнього середовища, що особливо важливо для великих промислових центрів. При цьому слід відмітити, що ТН є повністю або в значній мірі екологічно чистими джерелами. Теплові насоси, що реалізують прогресивну енергозберігаючу технологію виробництва теплоти, дозволяють підняти на якісно новий рівень системи теплопостачання.

Масове виробництво та впровадження ТН в теперішній час здійснюється в США, Японії, Німеччині, Франції, Швеції, Данії, Австрії, Румунії, Канаді та інших країнах. В цілому проблема створення ТН вийшла за межі окремих країн. Міжнародний Комітет з теплових насосів регулярно проводить наради, конференції. Публікується багато праць з цієї тематики. Багато закордонних фахівців вважають, що ТН в найближчій перспективі не тільки знайдуть широке застосування, але й займуть основне місце в низькотемпературних системах теплопостачання. ТН знаходять застосування як в побутовому секторі і промисловості, так і в сільськогосподарському виробництві.

В побутовому секторі весь досвід розвитку теплових насосів, в першу чергу, відноситься до централізованого теплопостачання. Зазначались два основних напрямки: перший – теплопостачання однодвосімейних котеджів, а при необхідності – літнє кондиціонування повітря; другий – теплохолодопостачання споруд спеціального призначення. Для цих цілей, у першому випадку, знайшли застосування теплові насоси з електроприводом тепловидатністю до 20 кВт, а у другому – тепловидатністю не більше 1000 кВт, як з електричними, так і неелектричними приводами. Тут як

низькотемпературні джерела використовуються: повітря, вода природних водоймищ, ґрунтові води, ґрунт, теплові та побутові скиди, сонячна радіація.

За кордоном все більше застосовуються так звані бівалентні опалювальні системи, що містять ТНУ та пікове джерело теплопостачання на газоподібному, рідкому або твердому паливі [3, 18]. При одночасному використанні ще і сонячного колектора систему називають трикомпонентною (тривалентною). В США та Японії переважне поширення отримали повітро-повітряні ТН тепловидатністю 2–17 кВт. Загальна кількість подібних установок в цих країнах складає більше 5 млн одиниць. При цьому певна частина діючих в США ТН обладнані піковими теплджерелами. В значно менших масштабах теплові насоси подібного типу застосовуються в Канаді – 100 тис. штук.

Якщо в США, Японії та Канаді в основному застосовуються повітро-повітряні ТНУ в моновалентному режимі, то в країнах Західної Європи частіше використовуються повітро-повітряні установки, що працюють у бівалентному режимі.

Найбільш широко теплові насоси у Європі застосовуються у Німеччині. Нині в країні діє 210 тис. установок з електричним приводом. З них – 50 тис. (1–2 кВт) призначені для опалення, а 160 тис. (10 кВт) – для гарячого водопостачання. Крім того, споруджено більше 500 теплових насосів з газовими двигунами [3].

Загальна кількість діючих ТН у Франції не перевищує 200 тис. установок. У переважній більшості ТН застосовуються у складі бівалентних опалювальних систем. Швейцарія є однією із країн, в яких перші ТН були побудовані ще в 30-х роках ХХ-го сторіччя (м. Цюрих – 80 кВт). В цей час в експлуатації перебуває приблизно 30 тис. установок.

Широко застосовуються теплові насоси в Австрії та Данії. Загальна їх кількість складає відповідно 30 та 28 тис. одиниць. В останні роки ТН стали все частіше застосовуватись у централізованому теплопостачанні. Найбільш

інтенсивно ці роботи розгорнулись у Швеції. Із діючих в країні 130 тис. теплових насосів 90 тис. мають сумарну теплопродуктивність 1000 МВт та забезпечують приблизно половину всього навантаження усіх ТН. Серед діючих великих теплонасосних станцій централізованого теплопостачання необхідно відзначити станції, що споруджені в містах Бурленге (24 МВт), Умеа (34 МВт), Ужала (39 МВт), Еребру (40 МВт) та Стокгольмі (160 МВт) [3]. Як низькотемпературні джерела для цих станцій використовуються міські стічні води, промислові водяні стоки та морська вода.

Крім Швеції, теплонасосні станції для централізованого теплопостачання споруджені також в інших західноєвропейських країнах, серед яких необхідно відзначити станції, що експлуатуються в Норвегії (м. Осло – 8 МВт), Німеччині (м. Киль – 9 МВт), Данії (м. Фредріксканн – 10 МВт), Швейцарії (м. Базель – 11 МВт).

В таблиці 2.1. наведені дані по збільшенню продажів теплових насосів у 16 країнах ЄС у 2022 році.

За даними Європейської асоціації теплових насосів теплові насоси забезпечують опалення 16% житлових та комерційних будівель у цих країнах.

В промисловості ТН в основному використовуються для процесів сушки, у випарних та дистиляційних установках, для взаємної передачі теплоти в одному або двох технологічних процесах, для теплопостачання цехів промислових підприємств та для рекомпресії пари (відпрацьованої та вторинної). При цьому привод ТН може бути застосований як електричний, так і неелектричний. Досвід застосування теплових насосів в країнах Північної Європи та Німеччини значний.

Так якщо в Німеччині експлуатується приблизно 10 тис. ТН, то в решті країн (Данія, Фінляндія, Швеція, Великобританія) кількість установок, що функціонують, нараховується десятками.

Таблиця 2.1

## Дані про продаж теплових насосів в окремих країнах ЄС



У сільськогосподарському виробництві теплові насоси знайшли широке застосування на молочно-тваринницьких фермах та стійлових приміщеннях (Німеччина, Данія, Франція, Швеція, США); для теплопостачання теплиць, оранжерей та шампінйонниць (Німеччина); для сушки зерна та кормів (Швейцарія, Данія, Нідерланди).

За масштабами застосування теплонасосних установок Україна значно відстає від розвинутих країн. Хоча дослідження в цій галузі здійснюються

давно [13], не визначені масштаби і галузі найбільш ефективного застосування ТНУ, а роботи, що пов'язані з розробкою і впровадженням ТНУ в промислову енергетику перебувають на стадії окремих проектних рішень і практичних застосувань.

Проте ринок теплових насосів в Україні демонструє сталий ріст. Цьому сприяє:

1. Зростання попиту на енергоефективність
2. Впровадження гібридних теплових насосів
3. Розвиток “розумних” систем управління
4. Збільшення підтримки від держави
5. Розширення мережі сервісу та підтримки
6. Зменшення впливу на навколишнє середовище

Виявлені такі доцільні галузі застосування теплових насосів, призначених для теплохолодопостачання:

- міст та промислових центрів з несприятливими екологічними характеристиками;
- будівель та споруд в регіонах з підвищеними вимогами до охорони навколишнього середовища (Чорноморське узбережжя Криму та Кавказу, Каспійське узбережжя, узбережжя озер Байкал, Іссик-Куль та ін.);
- промислових підприємств та прилеглих населених пунктів з використанням скидної низькотемпературної теплоти систем оборотного та прямотокового охолодження;
- виробничих процесів на тваринницьких фермах та приватних фабриках первинної переробки сировини.

Застосування теплових насосів вирішує проблему економії електроенергії в різних галузях народного господарства, і завод готовий реалізувати будь-які побажання замовників [16].

Використання теплових насосів для опалення, гарячого водопостачання і т.п., являє собою спосіб, альтернативний іншим способам, таким, як

традиційне спалювання органічного палива, широко поширене центральне парове чи водяне опалення, електрообігрів та інше.

Незважаючи на те, що можливість використання пристроїв, що здійснюють зворотний термодинамічний цикл, для вказаних цілей була вже досить давно, поширення ТН отримали лише в останні роки. Це пояснюється тим, що з різних причин ТН поступалися іншому опалювальному обладнанню. Нині зростаючий інтерес до ТН пояснюється перш за все їх енергетичними характеристиками.

Теплові насоси можна класифікувати за такими ознаками [18]:

- 1) за принципом дії;
- 2) за схемою застосування;
- 3) за джерелами низькотемпературної теплоти (ДНТ), що використовуються;
- 4) за поєднанням ДНТ з нагріваним у ТН середовищем;
- 5) за джерелом витрачуваної енергії.

За першою ознакою розрізняють: парокомпресійні, абсорбційні та термоелектричні ТН.

Схеми застосування можуть бути моновалентні (тільки ТН) та бівалентні (ТН у сполученні з додатковим джерелом теплоти - ДДТ).

Як ДДТ для ТН можуть бути використані: зовнішнє повітря; поверхневі води (ріка, став, море); підземні води; ґрунт; сонячна енергія; низькотемпературна теплота штучного походження (схидні води, нагріті продукти технологічних процесів, очищена вода станцій аерації, витяжне повітря систем вентиляції та ін.).

При класифікації за четвертою ознакою розрізняють такі основні варіанти: повітря-повітря; повітря-вода; ґрунт-повітря; ґрунт-вода; вода-повітря; вода-вода.

За 5 ознакою розрізняють ТН, що використовують для роботи електроенергію, паливо того чи іншого виду, вторинні енергетичні ресурси.

Найбільший вплив на економічність теплових насосів спричиняють такі фактори:

- системи теплопостачання;
- температури теплоджерела та нагріваного середовища;
- частка гарячого водопостачання у сумарному тепловому навантаженні;
- тривалість опалювального періоду;
- вид органічного палива в альтернативному варіанті теплопостачання;
- місце розташування низькотемпературних джерел та споживачів.

Недоліками є те, що технічна документація, яка надається споживачеві теплового насоса, явно недостатня для ефективного використання в конкретних теплотехнологічних системах.

## **2.2.Теплонасосні станції – ефективне джерело теплопостачання**

Згідно з ієрархічною структурою великих систем енергетики [13] системи енергопостачання вузлів (великих міст, промислових центрів) містять системи теплопостачання, які забезпечують споживачів теплотою (парою та гарячою водою) від електростанцій та великих котельних. Системи теплопостачання міст та промислових центрів розвиваються на базі теплофікації та централізованого теплопостачання.

Джерелами теплопостачання в таких системах можуть бути:

- 1) теплоелектроцентралі (ТЕЦ) на органічному паливі;
- 2) атомні ТЕЦ, атомні електростанції змішаного конденсаційно-теплофікаційного типу;
- 3) районні котельні на органічному паливі, або районні станції теплопостачання;
- 4) атомні котельні або атомні станції теплопостачання;
- 5) нові великі джерела теплопостачання (теплонасосні станції (ТНС)).

Основні напрямки розвитку джерел теплопостачання пов'язані з

тенденціями розвитку енергетичного комплексу країни. Як зазначено у [14], розвиток енергетики країни характеризують такі основні тенденції:

- 1) зменшення частки вуглеводневого палива, в першу чергу, нафти;
- 2) збільшення споживання дешевих твердих палив;
- 3) проведення активної енергозберігаючої політики;
- 4) покращення заходів з охорони навколишнього середовища.

Перерахованим тенденціям у повній мірі відповідає широке впровадження теплонасосних джерел теплопостачання.

Норвезький професор Г. Лорентцен виступив з доповіддю про розробку ТНС для приморських міст Норвегії з використанням теплоти морської води. В його статті [34] зазначено, що великим ТНУ з піковими котлами легше конкурувати з існуючими опалювальними установками, ніж індивідуальним ТНУ.

Рекомендації [15] використані в закордонних розробках ТНС. У 1981 р. було розпочате будівництво ТНС тепловою потужністю 6 МВт для централізованого теплопостачання одного з житлових районів Осло. Як низькотемпературне джерело використані стічні води.

Найбільш інтенсивно розвиваються ТНС у Швеції. У проспектах фірми «Сталь-Лаваль Турбін АББ» зазначено, що у вересні 1982 р. був введений в експлуатацію перший теплонасосний блок тепловою потужністю 12 МВт (в м. Бестероо), а до квітня 1983 р. нараховувалось 11 ТНС, що працювали та споруджувались, сумарною тепловою потужністю ТНУ в їх складі 215 МВт.

Теплонасосні установки у Швеції комплектуються також турбокомпресорами швейцарської фірми «Зульцер» та інших фірм. За станом на грудень 1982 р. у Швеції було 7 діючих та 16 споруджуваних ТНС загальною тепловою потужністю ТНУ близько 270 МВт, у тому числі 10 установок (4 діючих та 6 споруджуваних) на 193 МВт – фірми «Сталь-Лаваль» [159]. Серед діючих – «найбільша в світі теплонасосна станція» м. Упсала, що складається з трьох модулів «Сталь-Лаваль» по 13 МВт. Станція працює з

листопада 1982 р. як джерело централізованого теплопостачання та покриває 15 % теплового навантаження міста.

В США також споруджуються ТНУ для централізованого теплопостачання. Відомою є розробка ТНС для торговельного кварталу в Вашингтоні. Станція розрахована на опалювальне навантаження 3,8 МВт та навантаження гарячого водопостачання 0,9 МВт. Влітку передбачена робота ТНУ для гарячого водопостачання та холодопостачання.

Про створення центральної ТНУ тепловою потужністю 10 МВт у Великобританії повідомлялось у [3]. У Данії діє ТНУ такої ж потужності, яку планується довести до 34 МВт. У цій статті наведені також параметри та схема розроблюваної у Німеччині ТНС тепловою потужністю 100 МВт (ТНУ та піковий водогрійний котел по 50 МВт). На відміну від розглянутих вище ТНУ в цій установці прийнятий газомоторний привод компресорів.

В сучасних умовах із зростанням екологічних вимог увага до теплонасосних установок суттєво зростає. Технологія теплопостачання з використанням теплових насосів застосовується практично в усіх розвинених країнах світу. Усі широкомасштабні програми з енергозбереження, що реалізуються за кордоном, передбачають їх широке впровадження. Згідно з прогнозами Світового енергетичного комітету до 2020 р. у передових країнах частка опалення та гарячого водопостачання з використанням теплових насосів складе 75 % [9]. Корисним є досвід західних країн з впровадження ТНУ, в тому числі шляхом надання державою певних пільг або кредитів підприємствам [13].

В 1993 р. Генеральна дирекція з наукових досліджень Комісії Європейського Союзу затвердила комплексну програму впровадження ТНУ. Створюється банк даних фірм-виробників у Європі. Планується апробація нової техніки в різних проектах. В Німеччині створено інформаційний центр ТНУ, який щорічно інформує громадськість про переваги ТНУ, які дозволяють ефективно використовувати енергію та зменшити шкідливі викиди в

атмосферу.

В останні роки енергетичні, екологічні та економічні проблеми у світі зумовили широке використання теплонасосних установок (ТНУ) в системах централізованого теплопостачання міст. У західних країнах вже дійшли висновку, що одним з найбільш ефективних заходів з утилізації теплоти вторинних енергоресурсів є ТНУ. Одним з найбільш ефективних засобів утилізації теплоти низькотемпературних вторинних енергоресурсів є теплонасосні станції (ТНС), які широко застосовуються та добре зарекомендували себе у Швеції та інших західних країнах. У Швеції встановлено 50 великих ТНУ загальною тепловою потужністю 854 МВт. Усі вони використовують низькотемпературні вторинні енергоресурси та призначені в основному для централізованого теплопостачання. За даними шведських авторів [11], у Стокгольмі у 1994 р. кількість теплоти для теплопостачання, виробленої ТНС, склала 38 %. Це засвідчує, що ТНС є важливим та ефективним засобом виробництва теплоти.

Значну увагу розвитку нетрадиційної енергетики приділяє Україна. Так, згідно з прогнозами Міністерства палива та енергетики України, потужність ТНУ в Україні у 2010 р. планується довести до 1800 МВт.

Загальний технічно можливий потенціал нашої держави за напрямком використання ТНУ складає 12,03 млн т у. п. на рік. На даний час при промисловому використанні ТНУ в Україні можна досягти додаткових теплових потужностей у 4900 МВт.

Для економічної роботи цих установок необхідними є такі умови: сприятливе співвідношення цін на паливо та електроенергію, природні або промислові низькотемпературні джерела теплоти, а також достатньо потужна мережа споживачів, яка б забезпечувала цілорічну роботу ТНУ.

Оскільки в Україні до 2010 р. планується істотне підвищення потужності встановлених ТНУ, необхідно розробити високоефективне джерело теплопостачання з ТНУ. Для цього необхідно провести дослідження впливу

топології на ефективність роботи ТНС.

Є. І. Янтовським та Ю. В. Пустоваловим досліджувалась ефективність роботи ТНС з електроприводом в системах теплопостачання. Проводилась оптимізація параметрів та режимів роботи парокомпресійної ТНС на холодоагенті R12.

Ними розроблено ексергетичну методика порівняння парокомпресійних та абсорбційних ТНУ та інших джерел теплопостачання за ексергетичним ККД, визначено зони економічної ефективності ТНС та розроблено рекомендації по застосуванню ТНС.

В сучасних економічних умовах розроблені Є. І. Янтовським та Ю. В. Пустоваловим методики та рекомендації не висвітлюють реального стану ефективності застосування ТНС та можуть бути використані лише частково. Оскільки холодоагент R12 підлягає заміні як екологічно небезпечний, відкритим залишається питання пошуку оптимального холодоагенту для ТНУ та дослідження оптимальних режимів роботи ТНУ на різних холодоагентах.

Є. І. Янтовським та Ю. В. Пустоваловим досліджувалась обмежена кількість схем теплонасосних станцій. Не проводився аналіз впливу схем включення конденсаторів та випарників на ефективність роботи ТНУ. Відсутні дослідження ефективності роботи ТНС з іншими видами приводу компресора (ДВЗ, ГТУ, парова турбіна), що набувають актуальності з урахуванням теперішньої ситуації на енергетичному ринку України.

Оскільки ефективність впровадження ТНУ з електроприводом у значній мірі залежить від вартості електроенергії та палива, визначені ними зони ефективності ТНС можуть зміщуватись залежно від коливань цін на світових енергоринках.

Враховуючи зазначене вище, необхідно дослідити ефективність ТНС з різними схемами, складом обладнання та режимами роботи в нових економічних умовах.

В. Є. Онішков [17] висвітлив результати дослідження економічної

ефективності ТНС, а також питання вибору типу ТНС для промислового підприємства. Запропоновані ним аналітичні залежності повинні бути скореговані у відповідності з новими економічними умовами. Т. В. Морозюк у [16] переважно висвітлені дослідження водоаміачних термотрансформаторів, хоча також приділяється увага ефективності застосування парокompресійної ТНУ як альтернативного варіанта. А. Є. Денисовою у [18] досліджувалась ефективність комплексної альтернативної системи теплопостачання з використанням ТНУ, сонячного колектора, іншого обладнання.

В. П. Проценко у [14, 16] проводив дослідження ефективності застосування ТНУ з приводом компресора від двигуна внутрішнього згорання. Слід зазначити, що досліджувались лише конкретні схеми з певним визначеним складом обладнання. Дослідження економічної та енергетичної ефективності таких ТНУ проводилось для холодоагенту R12. Крім того, запропоновані ним рекомендації та узагальнення стосовно ефективності застосування ТНУ з приводом від ДВЗ можна використовувати лише частково в сучасних умовах.

Таким чином, аналітичний огляд літературних джерел свідчить, що у переважній більшості дослідження ефективності застосування ТНУ зводяться до визначення ефективності застосування ТНУ в певній системі з визначеним складом обладнання та зовнішніми зв'язками. По суті, в наявній літературі є лише поодинокі дослідження окремих застосувань ТНУ без узагальнення одержаних результатів та поширення їх на решту теплотехнологічних систем. Не визначено вплив зовнішніх умов та характеру споживачів при застосуванні теплонасосних установок в системах теплопостачання. Відсутні системні дослідження ефективності застосування ТНУ в залежності від конкретних джерел низькотемпературної теплоти.

Для кліматичних умов України відсутня систематизована інформація з ефективності застосування ТНУ для певних конкретних умов, схем та галузей застосування, немає узагальнень та методичних рекомендацій з вибору та

впровадження ТНУ в теплотехнологічні системи з різними схемами. Відсутня систематизована інформація про впровадження ТНУ та ефективність їх функціонування в реальних теплотехнологічних системах.

Не зважаючи на значний потенціал нашої держави за напрямком використання ТНУ, значного впровадження ТНУ в теплоенергетичну галузь не спостерігається. Для теплотехнологічних систем підприємств України недостатніми є системні дослідження умов теплопостачання цих підприємств з використанням теплових насосів.

## РОЗДІЛ 3

### УЗАГАЛЬНЕНА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА З ТЕПЛОНАСОСНОЮ УСТАНОВКОЮ

#### 3.1. Сфери застосування теплонасосних установок

Не зважаючи на досвід застосування ТНУ за кордоном, в нашій країні роботи з впровадження ТНУ перебувають, в основному, на стадії окремих досліджень. До факторів, які на теперішній час стимулюють впровадження ТНУ в промисловість і муніципальну енергетику слід віднести дефіцит паливних ресурсів, а також екологічні переваги ТНУ в порівнянні з альтернативними низькотемпературними джерелами теплопостачання.

Отже, основними питаннями, які розглядаються, є:

- 1) використання альтернативних холодоагентів для ТН для заміни озonoактивних фреонів, а також екологічні аспекти застосування ТН;
- 2) впровадження ТН в кліматичних умовах України;
- 3) впровадження ТН на промислових підприємствах;
- 4) можливість використання ВЕР для виробництва теплоти у ТН;
- 5) можливість впровадження ТН в систему централізованого теплопостачання;
- 6) оцінка енергетичних та економічних показників систем з ТН.

Системи теплопостачання з ТН переважно знаходять застосування у системах теплопостачання та вентиляції (опалення, гаряче водопостачання, кондиціонування), промисловості (у тому числі харчовій), та агропромислового комплексу. На рис. 3.1 наведений розподіл теплових насосів по галузях застосування, здійснений на основі систематизованої інформації.

Як видно з рис.3.1, найбільше поширення теплові насоси здобули в системах теплопостачання.

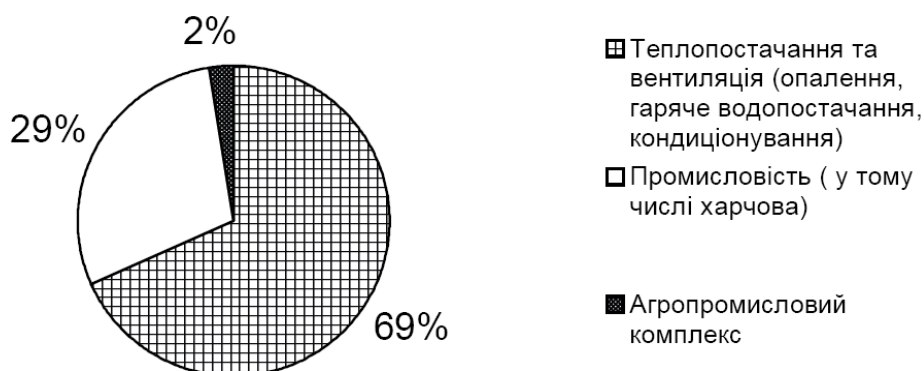


Рис. 3.1. Розподіл теплових насосів по галузях застосування на основі систематизованої інформації

Як джерела низькотемпературної теплоти в досліджуваних застосуваннях теплових насосів розглядаються: вода (в тому числі у вигляді ВЕР, стічна), атмосферне повітря, теплота ґрунту та водяна пара.

На рис. 3.2 показано розподіл теплових насосів за джерелами низькотемпературної теплоти.

Як видно з рис. 3.2, найбільш широко використовуваним джерелом низькотемпературної теплоти для теплових насосів є вода.

Результати впровадження систем з ТН висвітлені у 40 % публікацій, з яких впроваджено по галузях: 1) теплопостачання та вентиляція – 78 %; 2) промисловість – 22 %.

Розподіл впроваджень теплових насосів по галузях застосування наведений на рис. 3.3.

Як видно із рис. 3.3, теплові насоси переважно застосовуються для забезпечення потреб гарячого водопостачання, кондиціонування та опалення.

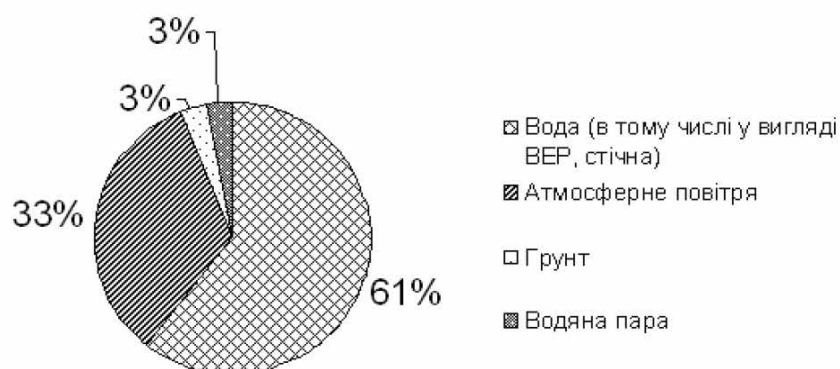


Рис. 3.2. Розподіл теплових насосів за джерелами низькотемпературної теплоти



Рис. 3.3. Розподіл впроваджень теплових насосів по галузях застосування

В зазначених системах використовується теплонасосне устаткування малої, середньої та великої потужності. Можливість застосування теплових насосів малої та середньої потужності (до 1 МВт) відбито у 59 % публікацій, а ТН великої потужності (понад 1 МВт) – у 41 %. Це пояснюється тим, що ТН малої та середньої потужності застосовуються переважно у теплових схемах промислових підприємств за умов невеликих теплових навантажень. У той же час ТН великої потужності знаходять застосування у системах централізованого теплопостачання за умов великих теплових навантажень теплових споживачів.

Теплові насоси можуть працювати як окремо, так і у складі бівалентної системи теплопостачання, яка, крім ТН, передбачає ще використання водогрійного котла як пікового джерела теплоти. Застосування бівалентних теплонасосних систем теплопостачання (теплонасосних станцій (ТНС)) розглянуто у 11 % публікацій.

Найбільші можливості має впровадження ТНС в системі централізованого теплопостачання з метою зниження собівартості теплової енергії та уникнення теплового забруднення навколишнього середовища.

Основна інформація з розробки та дослідження ефективності застосування ТНУ висвітлена у публікаціях таким чином:

- 1) проектування та дослідження ефективності систем теплопостачання з ТН, розробка схемних та технічних рішень – 41,9 %;
- 2) економічні передумови застосування ТН, техніко-економічна оцінка ефективності системи з ТН – 17,6 %;
- 3) задачі впровадження ТН, в тому числі і в кліматичних умовах України – 17,5 %;
- 4) ТН як засіб енерго- і ресурсозбереження, можливості використання утилізованої теплоти ВЕР промисловості та енергетики у виробництві теплоти тепловими насосами – 12,2 %;
- 5) можливості та ефективність використання ТН у теплових схемах промислових підприємств – 5,4 %;
- 6) екологічні аспекти застосування ТН – 5,4 %.

Зважаючи на широкий спектр питань, що розглядаються у напрямку розробки, дослідження та впровадження ТН у промисловість та енергетику, слід зазначити таке:

- 1) ТН все більше визнаються як екологічно чисті альтернативні джерела теплоти;
- 2) підтверджується універсальність ТН за джерелами низькотемпературної теплоти;

3) акцентується увага на необхідності розробки тепло насосних систем для кліматичних умов України;

4) зазначається можливість впровадження ТН у муніципальну теплоенергетику та переважно харчову промисловість з метою утилізації теплоти низькотемпературних ВЕР останніх та забезпечення навантажень теплових споживачів та теплоти господарських потреб підприємств;

5) можливість впровадження ТН підтверджується відповідними енергетичними та техніко-економічними розрахунками окремих застосувань;

6) техніко-економічні та енергетичні оцінки можливих застосувань ТН не супроводжуються ще й екологічною оцінкою. Врахування зменшення забруднення навколишнього середовища за рахунок використання ТН (викиди CO, NO<sub>x</sub>, теплове забруднення) та відповідного зменшення відшкодувань за шкідливі та теплові викиди може суттєво покращити економічні показники роботи підприємств та зменшити термін окупності теплонасосного обладнання. Отже, виникає необхідність екологічно-економічної оцінки ТН.

Наприкінці слід зазначити, що зростанню застосувань теплових насосів в Україні сприяло б створення добре розробленої методики техніко-економічних та екологічних розрахунків ефективності застосування теплових насосів з врахуванням використання конкретних місцевих джерел низькотемпературної енергії. В наш час розробляються відповідні обґрунтування. Очевидно, що реальною основою для поширення досвіду застосування теплових насосів та методів їх розрахунків міг би стати досвід проектування та експлуатації ТН у теплових схемах підприємств енергетичної та харчової галузей.

### **3.2. Структура узагальненої теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою**

Ефективність теплових насосів у значній мірі визначається доцільним розташуванням їх в загальній енергетичній системі. Включення теплового

насоса в загальну схему здійснюється за допомогою периферійного обладнання для теплонасосних установок. Усі ці агрегати з'єднуються в єдину опалювальну систему з тепловими насосами або в охолоджувально-нагрівальну систему.

Узагальнена схема опалювальної системи з тепловим насосом у спрощеному вигляді наведена на рис. 3.4.

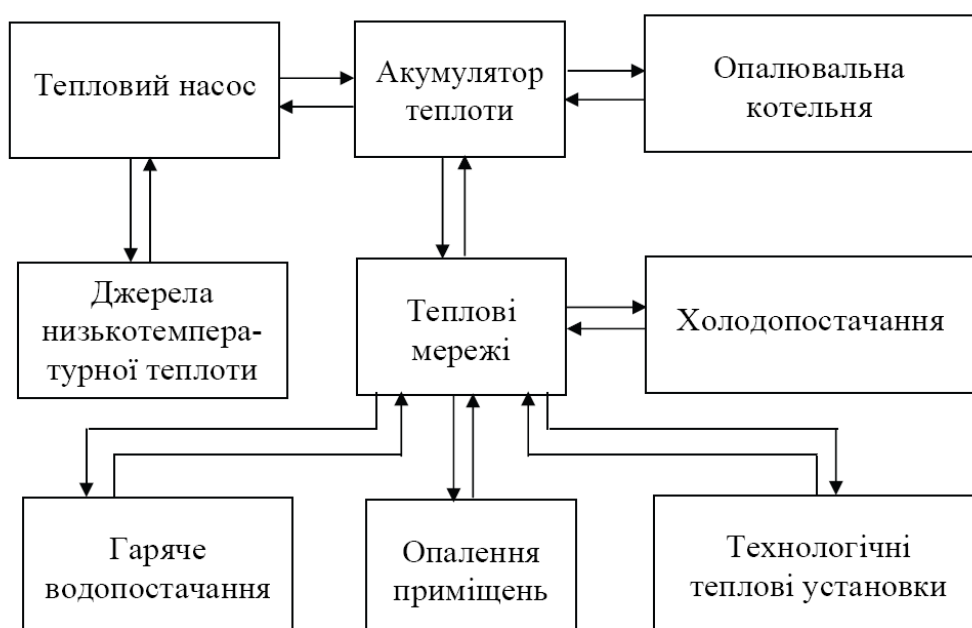


Рис. 3.4. Узагальнена схема опалювальної системи з тепловим насосом

Така узагальнена схема має певні недоліки, а саме:

- 1) відсутність енергетичних зв'язків (наведені тільки теплові зв'язки);
- 2) як складова частина системи відсутній привод компресора;
- 3) не враховано зв'язки верхнього (у конденсаторі) та нижнього (у випарнику) рівнів теплового насоса;
- 4) тепловий насос, опалювальна котельня та теплові мережі не пов'язані між собою безпосередньо, а тільки через акумулятор;
- 5) не розглянуті джерела теплоти, альтернативні тепловому насосу;
- 6) передбачено холодопостачання тільки через акумулятор, теплові мережі, тобто на верхньому рівні (конденсатора). Не передбачено

холодопостачання на нижньому рівні (випарника).

Враховуючи зазначені вище недоліки, подальше удосконалення наведеної схеми виконане у дослідженні [19].

Удосконалена схема включає в себе, як складові частини, теплонасосне, котельне, енергетичне, утилізаційне обладнання, теплообмінне устаткування, акумулятори, ємності, джерела палива, енергії, теплоти та холоду, споживачів теплоти та холоду, допоміжне обладнання та інше. Окремо наведені системи, з якими порівнюється ефективність теплонасосних систем. Ця схема враховує й опалювальні системи з тепловими насосами, досліджені автором, а також складові частини цих систем та зв'язки. Така схема дозволяє з'ясувати місце проведених досліджень у загальній системі.

Узагальнена теплотехнологічна система з теплонапосною установкою є узагальненням набутого досвіду застосування теплонасосних установок в системах теплопостачання, а також синтезу теплотехнологічних систем з ТНУ. Зазначена система у зручному вигляді концентрує досягнення в області формування теплотехнологічних систем з ТНУ та дослідження ефективності застосування тепло насосних установок в системах теплопостачання.

Узагальнена теплотехнологічна система з ТНУ – це виявлення внутрішніх сутнісних зв'язків підсистем та елементів підсистем в теплотехнологічній системі з ТНУ. Зазначена узагальнена система дозволяє обґрунтовано описувати зв'язки підсистем та елементів системи з теплонапосною установкою.

Узагальнена теплотехнологічна система з ТНУ допомагає у виборі складу обладнання, встановленні зв'язків між обладнанням та виборі режимів роботи реальних теплотехнологічних систем з ТНУ.

Узагальнена теплотехнологічна система з ТНУ є відкритою системою.

Вона може розвиватись у міру розвитку науково-технічного прогресу в цій області, накопичувати та узагальнювати досягнення у сфері досліджень та синтезу теплотехнологічних систем з ТНУ. Враховуючи зазначене вище, за

методологією створення узагальненої теплотехнологічної системи, можливий подальший розвиток узагальненої теплотехнологічної системи з ТНУ в концентрованому вигляді.

Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою характеризується складом обладнання, схемами та режимами роботи. Режими роботи реальних теплотехнологічних систем з тепловими насосами у значній мірі залежать від складу обладнання та схеми теплотехнологічної системи.

На рис. 3.5 наведена узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою у спрощеному вигляді. Вона складається з ряду підсистем, а також зв'язків між ними. Як зв'язки між підсистемами враховуються потоки теплової енергії різних температурних рівнів, потоки електричної енергії та палива. На межі зазначених підсистем виявлені зв'язки між ними, які не висвітлені у наявній літературі, або не були досліджені.

Для наочності аналізу узагальненої теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою були визначені такі підсистеми:

- 1) підсистема теплового насосу;
- 2) підсистема низькотемпературних джерел теплоти;
- 3) підсистема джерел енергії;
- 4) підсистема приводу компресора теплового насоса;
- 5) підсистема утилізації теплоти приводу;
- 6) підсистема акумуляції теплоти;
- 7) підсистема подачі теплоносія;
- 8) підсистема підвищення температурного рівня;
- 9) підсистема споживачів теплоти;
- 10) підсистема традиційних джерел теплоти.

Кожна з зазначених підсистем також характеризується певним складом обладнання, схемами та режимами роботи. Отже, слід проаналізувати ці підсистеми.

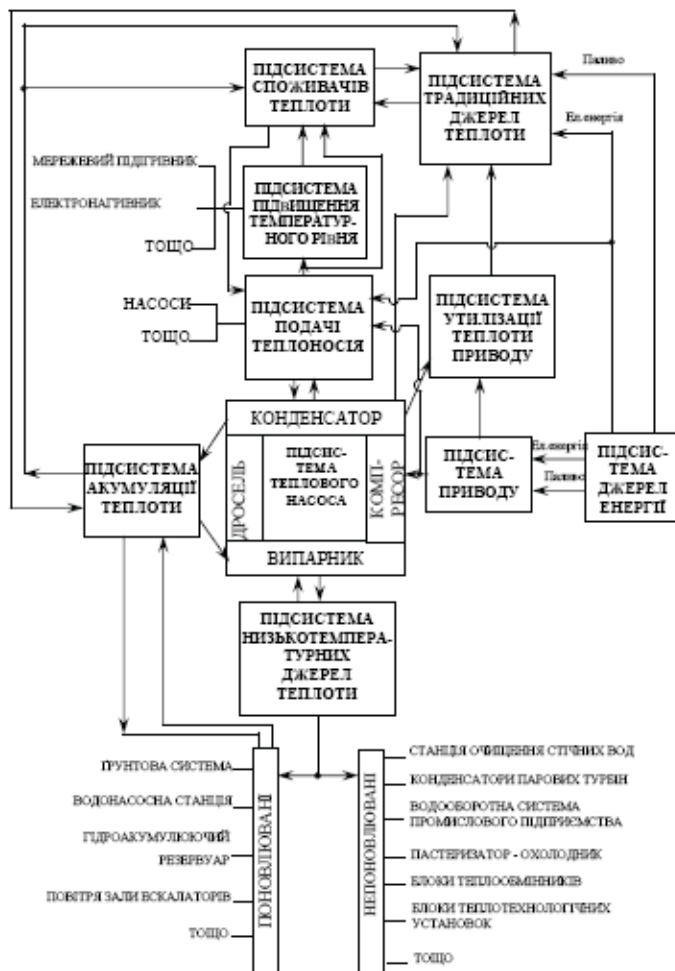


Рис. 3.5. Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою

1. До складу підсистеми теплового насоса входять основні елементи теплового насоса (випарник, компресор, конденсатор, дросель).

Також в цій підсистемі враховуються схеми включення випарників та конденсаторів теплових насосів (паралельні, послідовні тощо). Підсистема теплового насоса в варіантному вигляді представлена на рисунках 3.6 та 3.7 відповідно.

На рис. 2.6 показані такі варіанти підсистеми теплового насоса:

- а) – схема з паралельним включенням випарників та конденсаторів;
- б) – схема з послідовним включенням конденсаторів та паралельним

включенням випарників;

в) – схема з послідовним включенням випарників та паралельним включенням конденсаторів;

г) – схема з послідовним включенням випарників та конденсаторів;

д) – каскадна схема;

е) – каскадна схема з паралельним включенням випарників з різними температурними рівнями та послідовним включенням конденсаторів;

є) – каскадна схема з послідовним включенням випарників та паралельним включенням конденсаторів з різними температурними рівнями;

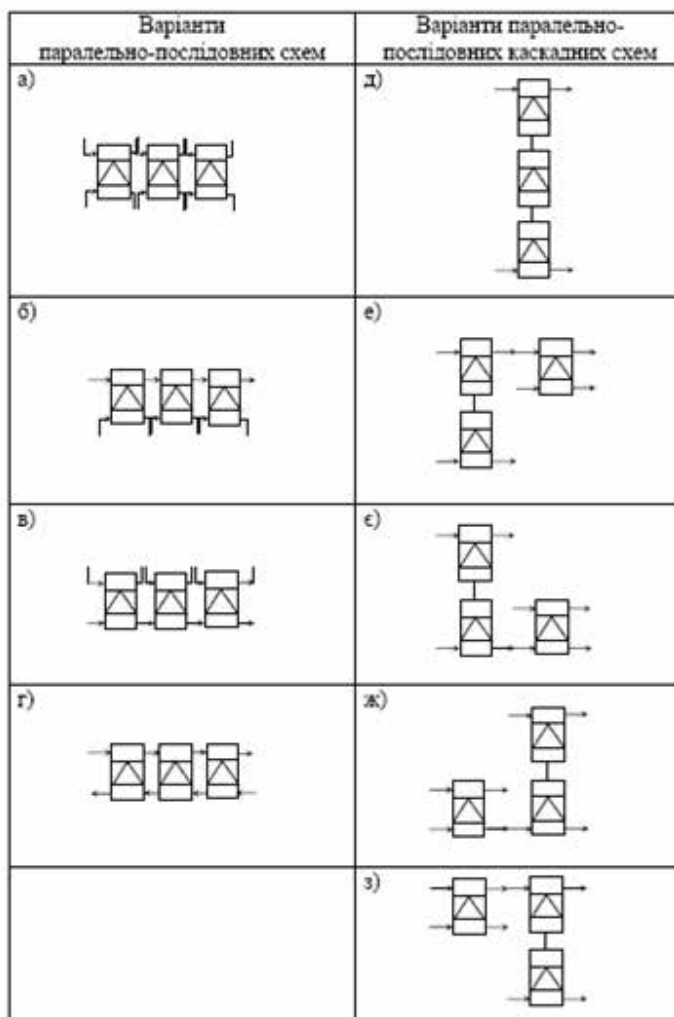


Рис. 3.6. Підсистема теплового насоса (варіанти підсистеми теплового насоса з трьох теплових насосів)

ж) – каскадна схема з послідовним включенням випарників та паралельним включенням конденсаторів з різними температурними рівнями;

з) – каскадна схема з паралельним включенням випарників з різними температурними рівнями та послідовним включенням конденсаторів.

Зауважимо, що:

1) схемам е) та з) відповідають різні температурні режими в випарниках.

2) схемам е) та ж) відповідають різні температурні режими в конденсаторах.

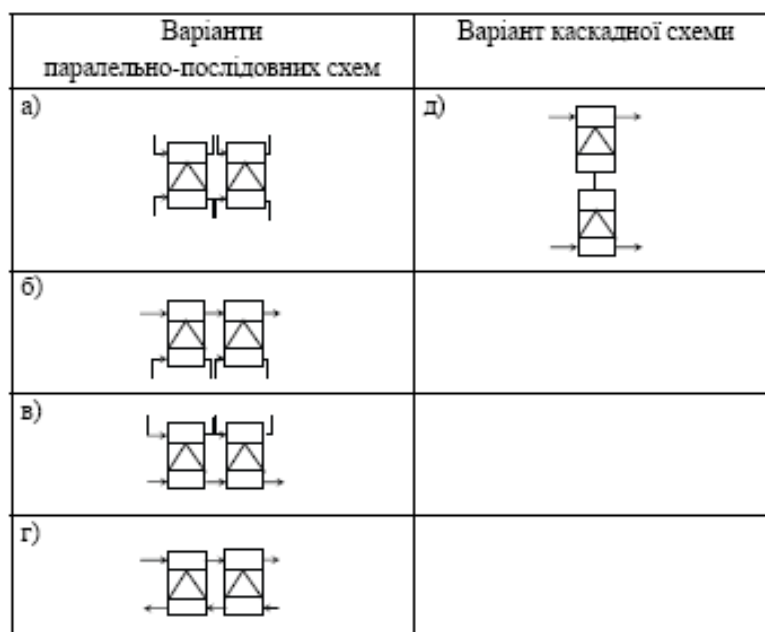


Рис. 3.7. Підсистема теплового насоса (варіанти підсистеми теплового насоса з двох теплових насосів)

2. Підсистема низькотемпературних джерел теплоти передбачає можливість використання як поновлюваних, так і не поновлюваних джерел теплоти.

Як поновлювані джерела низькотемпературної теплоти для теплового насоса розглядаються: ґрунтова система, водонасосна станція, гідроакумулюючий резервуар, повітря зали ескалаторів тощо. Серед непоновлюваних джерел теплоти слід відзначити станцію очищення стічних

вод, конденсатори парових турбін, водооборотну систему промислового підприємства, пастеризатори–охолодники, блоки теплообмінників, блоки теплотехнологічних установок тощо.

За температурними рівнями можливе використання в узагальненій системі таких джерел низькотемпературної теплоти:

- повітря зали ескалаторів ( $t = 15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- вода з шахт ( $t = 40\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- вода з конденсаторів парових турбін ( $t = 25\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- вода річок ( $t = 4\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- комунальні стоки ( $t = 10\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- оборотна вода промислового підприємства ( $t = 25\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- теплота ґрунту (розсолу) ( $t = 8\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- промислові стоки ( $t = 40\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

На рис. 3.7 показані такі варіанти підсистеми теплового насоса:

- а) – схема з паралельним включенням випарників та конденсаторів;
- б) – схема з послідовним включенням конденсаторів та паралельним включенням випарників;
- в) – схема з послідовним включенням випарників та паралельним включенням конденсаторів;
- г) – схема з послідовним включенням випарників та конденсаторів;
- д) – каскадна схема.

3. Підсистема джерел енергії враховує джерела палива (вугілля, природний газ тощо) та джерела електричної енергії (ТЕЦ, КЕС, ГЕС тощо), необхідні для функціонування теплотехнологічної системи.

4. Підсистема приводу теплового насоса передбачає різні види приводу компресора теплового насоса: електричний, від двигуна внутрішнього згорання, від газової турбіни, від гідротурбіни. До складу підсистеми приводу компресора теплового насоса входять: електричний двигун, газовий двигун внутрішнього згорання, газова турбіна, гідротурбіна.

5. Підсистема утилізації теплоти приводу розглядається для випадків, коли привод компресора теплового насоса здійснюється від двигуна внутрішнього згорання або від газової турбіни. За таких умов до складу зазначеної підсистеми входять: утилізатор відхідних газів та система охолодження двигуна внутрішнього згорання, а також утилізатор відхідних газів газової турбіни. У підсистемі враховуються різні схеми включення зазначеного обладнання. Підсистема утилізації теплоти приводу теплового насоса в узагальненому та варіантному вигляді представлена на рисунках 3.8 та 3.9 відповідно.

6. Підсистема акумуляції теплоти передбачає акумулювання теплоти різних температурних рівнів. До складу підсистеми акумуляції теплоти входять такі елементи, як: бак-акумулятор, ґрунтові системи акумуляції теплоти, різні акумулюючі системи та ємності. Зазначене обладнання може бути підключене за різними схемами.

7. Підсистема подачі теплоносія враховує допоміжне обладнання, необхідне для транспортування теплоносія (насоси тощо).

8. Підсистема підвищення температурного рівня передбачає обладнання, призначене для догрівання теплоносія після конденсаторів теплового насоса. Як таке обладнання слід розглядати пікові водогрійні котли, мережеві підігрівники, електронагрівники тощо.

9. Підсистема споживачів теплоти представлена системою опалення та гарячого водопостачання споживачів. Така система працює за опалювальним графіком та має певні режими роботи.

10. Підсистема традиційних джерел теплоти враховує джерела теплоти, альтернативні теплотехнологічній системі з тепло насосною установкою. Ефективність теплотехнологічних систем з теплонасосними установками порівнювалась з ефективністю пікової опалювальної водогрійної котельні, систем електронагріву. Їх розташування та зв'язки між елементами підсистеми також враховані в цій підсистемі.

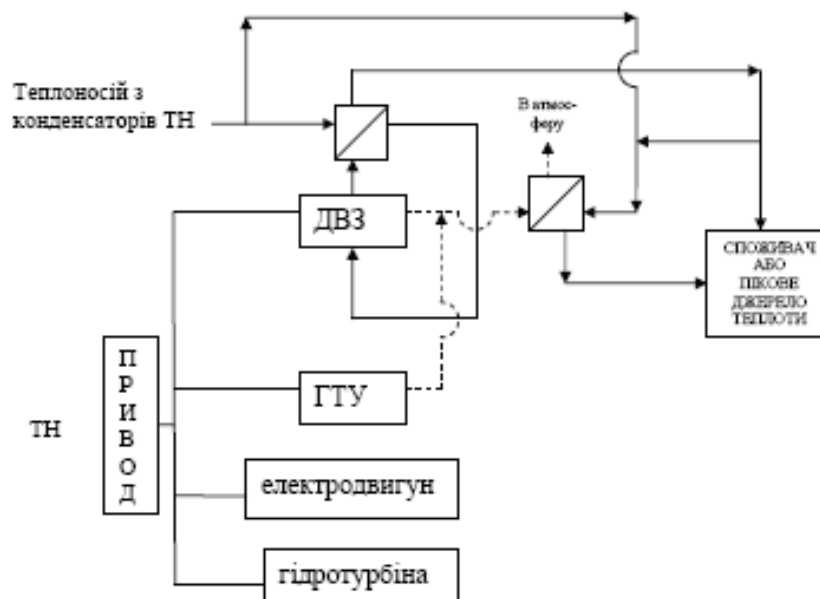


Рис.3.8. Підсистема утилізації теплоти приводу теплового насоса в узагальненому вигляді

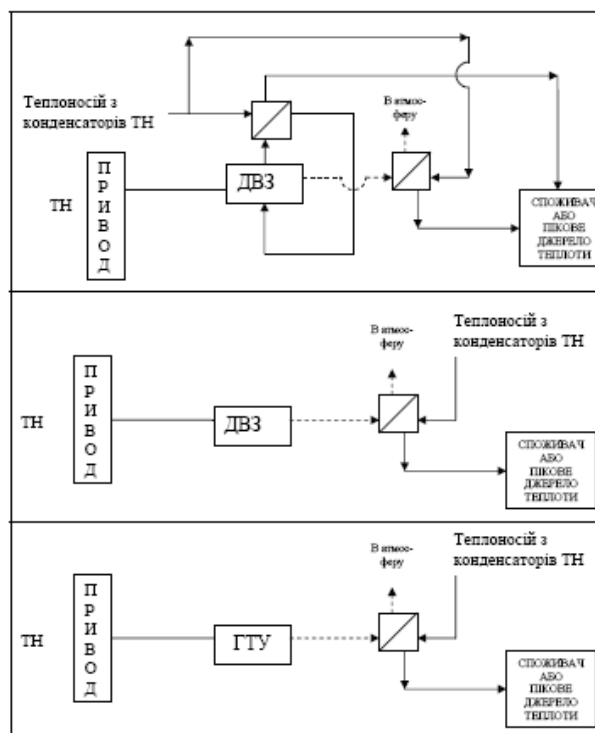


Рис. 3.9 Підсистема утилізації теплоти приводу теплового насоса у варіантному вигляді

Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою (див. рис. 3.5) містить надлишкові зв'язки, елементи та підсистеми. На основі такої узагальненої системи можливий синтез реальних теплотехнологічних систем з теплонасосними установками та аналіз систем, дослідження ефективності яких вже проводились.

Економія органічного палива та термін окупності теплових насосів з електричним приводом компресора у значній мірі залежить від співвідношення цін на електроенергію та паливо. Внаслідок високої вартості електричної енергії в Україні в найближчі роки не слід очікувати помітного впровадження ТНУ з електроприводом.

Проте, альтернативу ТНУ з електроприводом можуть скласти теплові насоси з приводом компресора від двигуна внутрішнього згорання або від газової турбіни, економічна ефективність яких не залежить від вартості електроенергії. Тобто, можливе створення когенераційних систем з тепловими насосами для роботи в системах теплопостачання. Це відповідає тенденціям розвитку паливно-енергетичного комплексу країни, а також перспективним програмам розвитку житлово-комунального господарства.

Ефект економії палива когенераційною установкою в порівнянні з роздільним виробництвом тієї ж кількості теплоти та електроенергії досягається за рахунок заміщення частини палива, що спалювалось в котлі, теплотою відпрацьованих газів двигуна або газотурбінної установки. Крім того, перевагою когенераційних установок є те, що електроенергія виробляється практично в місці її споживання. Це ліквідує колосальні втрати (які досягають в деяких випадках 50 %) в лініях електропередачі.

Застосування теплонасосних установок з приводом компресора від двигуна внутрішнього згорання або від газотурбінної установки може розглядатись не тільки як один з важливих напрямків енерго- та ресурсозбереження, але й як засіб підвищення конкурентоспроможності ТНУ.

## РОЗДІЛ 4

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОАСОСНИХ УСТАНОВОК

#### 4.1. Ефективність застосування ТНУ з електроприводом компресора на теплонасосних станціях

Теплонасосна станція (ТНС) являє собою комплексне енергетичне підприємство, яке призначене для централізованого теплопостачання (рис. 4.1). В ТНС перетворення енергії здійснюється в двох установках: ТНУ і водогрійних котлах (ВК). При цьому в передвключеній ТНУ підводиться не первісна енергія палива, а перетворена енергія в формі механічної роботи. На рис. 4.1 наведена принципова схема ТНС, яка складається з парокompресійної ТНУ і водогрійного котла, який включений послідовно з конденсатором ТНУ. Теплонасосна станція забезпечує нагрів заданої витрати мережевої води в системі теплофікації від температури  $T_{з\text{мв}}$  до  $T_{п\text{мв}}$  (позначення температур див. на рис. 4.1).

Оскільки енергетична ефективність роботи ТНУ і ВК відрізняються, то розподіл підігріву мережевої води між ними буде суттєво впливати на загальну ефективність роботи ТНС. Очевидно, що для кожного заданого температурного режиму роботи теплової мережі ( $T_{п\text{мв}}/T_{з\text{мв}}$ ) має існувати певний оптимальний розподіл підігріву води між ТНУ ( $T_{тн} - T_{з\text{мв}}$ ) і ВК ( $T_{п\text{мв}} - T_{тн}$ ). Дійсно, якщо підігрів води в ТНУ буде незначним, то загальна ефективність роботи ТНС буде мало відрізнятись від ефективності роботи ВК, незважаючи на те, що власне для ТНУ вона може виявитись і дуже високою. Переважний підігрів води в ТНУ навпаки приведе до того, що загальна ефективність роботи ТНС буде наближатись до ефективності роботи ТНУ. При цьому не виключено, що остання з підвищенням температури  $T_{тн}$  може виявитись значно нижчою за ефективність роботи ВК. Таким чином, вирішення задачі успішного впровадження ТНС зводиться до визначення

оптимального розподілу навантаження між ТНУ і ВК для різних температурних режимів роботи теплової мережі.

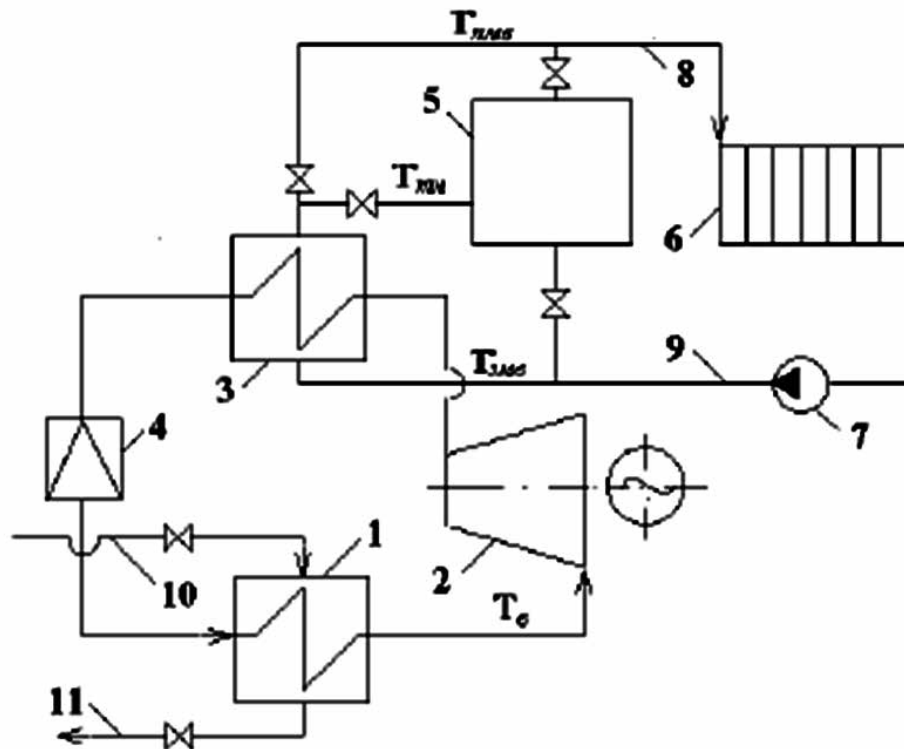


Рис. 4.1. Схема теплонасосної станції:

1 – випарник ТНУ; 2 – компресор з електроприводом; 3 – конденсатор ТНУ; 4 – дросельний вентиль; 5 – водогрійний котел; 6 – теплові споживачі; 7 – мережевий насос; 8 і 9 – лінії прямої та зворотної мережевої води; 10 і 11 – лінії низькотемпературного джерела енергії;  $T_{\text{в}}$  і  $T_{\text{к}}$  – температури випаровування і конденсації холодоагенту в ТНУ;  $T_{\text{тн}}$  – температура підігрітої води в ТНУ;  $T_{\text{пмв}}$  і  $T_{\text{змв}}$  – температура прямої та зворотної мережевої води в системі теплопостачання

Ця задача розв'язувалась методом математичного моделювання роботи ТНС потужністю 60 МВт для кількох режимів роботи системи теплофікації. Розглядалися варіанти роботи ТНС з такими температурами  $T_{\text{пмв}}$ : 90, 100, 130 і 150 °С. Температура зворотної мережевої води  $T_{\text{змв}}$  варіювалась від 45 до 70

°С. До складу досліджуваної ТНС входили три водогрійних котли КВ-ГМ-10 з максимальною потужністю 11,6 МВт і три аміачних ТНУ на базі турбокомпресійних агрегатів АТФТ-5-10 і випарювально-конденсаційних агрегатів АИКТ-10 з максимальною потужністю по 11,6 МВт. Низькотемпературним джерелом була стічна вода промислового підприємства з температурою 25 °С, яка охолоджувалась у випарнику ТНУ на 8 °С. В основу математичної моделі досліджень були покладені рівняння для розрахунків дійсних термодинамічних циклів ТНУ, рівняння матеріальних і теплових балансів елементів схеми ТНС, паспортні дані агрегатів ТНУ і ВК [188, 192–199]. Варіантні розрахунки здійснювались за умовами:  $T_{\text{тн}} = \text{var}$ ,  $T_{\text{змв}} = \text{const}$  і  $T_{\text{змв}} = \text{var}$ ,  $T_{\text{тн}} = \text{const}$ . За порівняльний варіант приймався варіант роботи водогрійної котельні, до складу якої входило шість водогрійних котлів КВ-ГМ-10.

На рис. 4.2 для прикладу наведені залежності зміни показників ефективності роботи ТНУ (коефіцієнта перетворення  $\phi$ , ексергетичного ККД  $\eta_e$ , питомої витрати умовного палива  $B$ , кг/ГДж) від температури підігріву мережевої води в ТНУ для режиму роботи теплової мережі 100/50. Із цього рисунку видно, що ефективність роботи ТНУ зменшується зі збільшенням температури  $T_{\text{тн}}$ , що зумовлено зростанням витрат електроенергії на привод компресора. Подібні залежності спостерігаються і для інших температурних режимів роботи системи теплофікації.

Значення питомої витрати умовного палива і економії умовного палива  $\Delta B$ , кг/с на ТНС в залежності від температури  $T_{\text{тн}}$  для того ж самого температурного режиму, що і на рис. 4.2, показані на рис. 4.3.

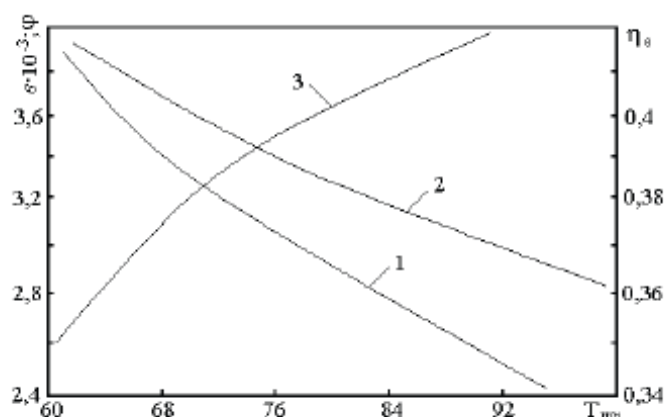


Рис. 4.2. Поточні значення коефіцієнтів ефективності роботи

ТНУ: 1 – значення  $\varphi$ ; 2 –  $\eta_e$ ; 3 –  $B$

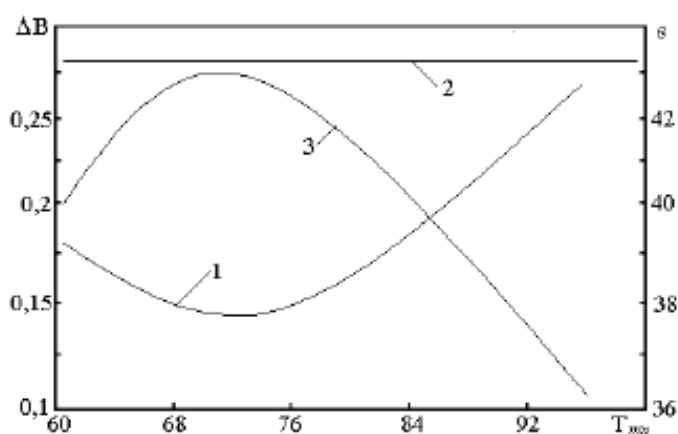


Рис. 4.3 Значення питомої витрати умовного палива і економії умовного палива

Тут для порівняння наведено також значення питомої витрати умовного палива на водогрійні котли (лінія 2). Наведені залежності свідчать про те, що питома витрата умовного палива на ТНС завдяки застосуванню ТНУ може бути знижена до 14 %, зумовлюючи економію в порівнянні з роботою котельні до 0,285 кг/с або до 1,026 т/год, що за опалувальний сезон ( $\tau_{\text{оп}} = 5000$  год.) дає економію умовного палива до 5130 т і виключає з роботи три водогрійних котла

Аналогічні залежності для інших режимів роботи теплової мережі

дозволили визначити оптимальні значення підігріву води в ТНУ, а, отже, і оптимальні режими роботи останніх. За результатами досліджень встановлено, що для температурних режимів 90/50 і 100/50 оптимальні значення  $T_{тн}$  складають 73 °С, для режимів 130/60 і 150/60 – 76 °С, для режиму 150/70 – 80 °С. Це означає, що відпуск води в систему гарячого водопостачання (за нормами 65 °С) з потужністю 15 МВт для нашого випадку в міжопалювальний сезон ( $\tau_{мо} = 3040$  год) може здійснюватись безпосередньо від ТНУ. Тоді додаткова економія умовного палива за цей період на підставі рис. 4.2 і 4.3 складатиме, 1594 т

Таким чином, загальна річна економія умовного палива на ТНС в порівнянні з котельнею для режиму роботи теплової мережі 100/50 може складати 6724 т. Зазначимо, що цей температурний режим є найбільш характерним для нашої кліматичної зони і є найбільш оптимальним для роботи ТНС. Для режимів з більшими значеннями температури  $T_{пмв}$  значення оптимальної температури  $T_{тн}$  підвищуються.

Але, як відомо [12], підвищення температури води на вході у водогрійний котел приводить до зменшення його ККД внаслідок зростання температури відхідних газів.

Зауважимо також, що зменшення витрат органічного палива за рахунок впровадження ТНС зменшує витрати енергії на його видобуток і транспортування, витрати кисню на його спалювання, витрати енергії на евакуацію продуктів згорання, а головне, зменшує кількість шкідливих викидів в атмосферу. Розрахунки показують, що для нашого випадку роботи базової котельні на природному газі зазначена економія палива зменшує річну витрату кисню на 1200 м<sup>3</sup>, викидів окису вуглецю і оксидів азоту – на 5 і 23 т відповідно, заощаджує витрати електроенергії на привод тягодуттьових установок водогрійних котлів в кількості 116 МВт·год. Ці ж показники, що віднесені до одиниці відпущеної теплової потужності, складають на рік відповідно 20 м<sup>3</sup>/МВт; 0,083 т/МВт; 0,383 т/МВт і 1,93 МВт· год/МВт.

Залежності показників ефективності роботи ТНС за умови оптимального підігріву води в ТНУ від значень температур прямої і зворотної мережевої води показані на рис. 4.4 і 4.5 відповідно.

Тут також наведені залежності зміни відносного навантаження ТНУ  $\beta = Q_{\text{ТНУ}}/Q_{\text{ТНС}}$ , де  $Q_{\text{ТНУ}}$  і  $Q_{\text{ТНС}}$  – теплове навантаження ТНУ і ТНС відповідно. Із рис. 4.4 видно, що з підвищенням температури  $T_{\text{пмв}}$  економія умовного палива  $\Delta B$  і відносний ексергетичний ККД, який являє собою відношення ексергетичних ККД ТНУ і ВК, зменшуються.

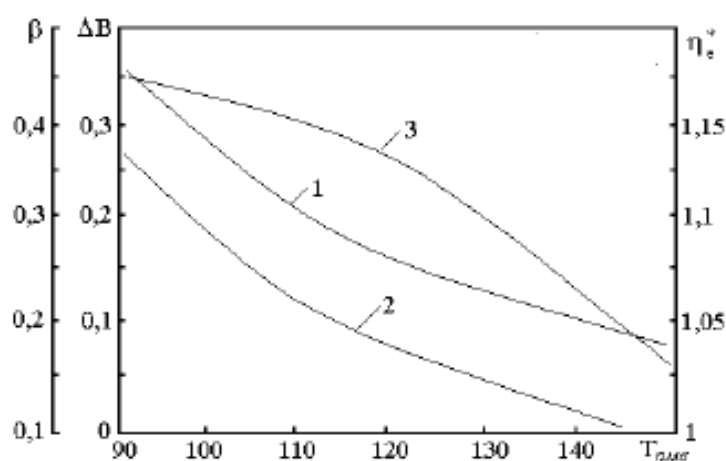


Рис. 4.4 Залежності показників ефективності роботи ТНС за умови оптимального підігріву води в ТНУ від значень температур прямої і зворотної мережевої води

Це пояснюється тим, що зі збільшенням температури  $T_{\text{пмв}}$  зменшується частка відносного навантаження ТНУ за рахунок збільшення навантаження менш економічних водогрійних котлів.

Аналогічний характер зміни зазначених величин спостерігається і на рис. 4.5 за умови зростання температури  $T_{\text{зmv}}$ . Тут зі збільшенням останньої зменшується величина  $Q_{\text{ТНУ}}$ , що зумовлює зменшення  $\beta$  і збільшення навантаження водогрійних котлів. Результати досліджень показали, що найбільш економічними режимами роботи ТНС слід вважати режими, коли  $\beta = 0,45-0,25$  (менші значення  $\beta$  відповідають більшим значенням  $T_{\text{пмв}}$ ).

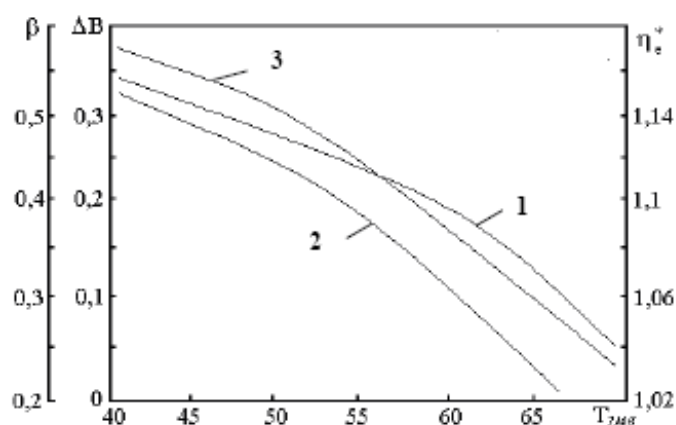


Рис. 4.5. Зміна енергетичних характеристик роботи ТНС за умови  $T_{пмв} = 100$  °C: 1 – значення  $\Delta B$ ; 2 –  $\eta_c^*$ ; 3 –  $\beta^*$

Згідно з проведеними дослідженнями, можна зробити такі висновки:

1. Застосування теплонасосних станцій на базі водогрійних котелень забезпечує до 15 % економії палива, зменшує витрати електроенергії на тягодуттєві установки і кількість шкідливих викидів в атмосферу.

2. Оптимальні температури підігріву мережевої води в теплонасосних установках залежать від температурного графіка роботи систем теплофікації і складають 73–80 °C.

3. Оптимальними режимами роботи теплонасосних станцій слід вважати режими з майже однаковим розподілом навантажень між теплонасосними установками і водогрійними котлами.

#### 4.2. Ефективність застосування ТНУ з дизельним приводом компресора на теплонасосних станціях

Використання природного газу як моторного палива, не дивлячись на переважне поширення в світі ТНУ з електроприводом, має сприяти створенню і впровадженню ТНУ з приводом компресора від газових двигунів. Застосування таких ТНУ може розглядатись як один з важливих напрямів

енерго- і ресурсозбереження, оскільки передбачає утилізацію відхідних газів після газового двигуна.

В [15] розглянуто лише загальні умови конкурентоспроможності таких ТНУ в залежності від вартості палива. Зважаючи на це, ми ставили за мету виявити переваги застосування ТНУ з дизельним двигуном в порівнянні з ТНУ, яка працює з електроприводом компресора. Силовими агрегатами для привода компресорів ТНУ були дизель-генераторні станції 64Н32/35 з потужністю електрогенератора 2,5 МВт і ефективним ККД двигуна 0,37; виробництво яких здійснюється з 1993 р. за ліцензією фінської фірми «Вяртсила». Як і раніше, досліджувалась ефективність роботи ТНС з трьома ТНУ АТФТ5-10 і трьома водогрійними котлами КВ-ГМ-10. Принципова схема такої ТНС показана на рис. 4.6. Привод компресора ТНУ здійснюється за допомогою дизельного двигуна 5, електрогенератора 6, електродвигуна 4 і мультиплікатора 3. Частка зворотної мережевої води із системи теплофікації поступово підігрівається в утилізаційних поверхнях системи охолодження двигуна 7 і в утилізаторі відхідних газів 8 до температури підігрітої в ТНУ води  $T_{тн}$ .

Оскільки оптимальні режими роботи ТНУ за температурою підігріву мережевої води  $T_{тн}$  були вже визначені, то аналізувалась робота ТНУ і ТНС за умови підігріву мережевої води до оптимальної температури. За порівняльний варіант приймався варіант роботи ТНУ з електроприводом компресора.

Далі, в залежності від температурного режиму роботи теплової мережі, гаряча вода може додатково підігріватись у водогрійному котлі або безпосередньо надходити до теплових споживачів 13.

Як і в попередньому випадку, досліджувалась робота ТНУ з такими ж самими значеннями  $T_{пмв}$ : 90, 100, 130 і 150 °С. Температура зворотної мережевої води варіювалась від 40 до 70 °С.

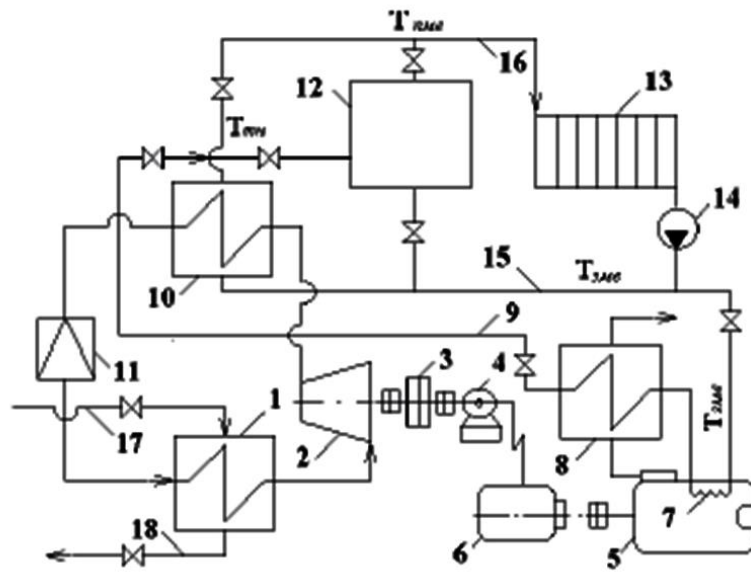


Рис. 4.6. Принципова схема ТНС з дизель-генераторним приводом компресора ТНУ та утилізацією теплоти відхідних газів після дизеля:

1 – випарник ТНУ; 2 – компресор; 3 – мультиплікатор; 4 – електродвигун;  
 5 – дизельний двигун; 6 – електрогенератор; 7 – теплообмінна поверхня системи охолодження дизеля; 8 – утилізатор відхідних газів після дизельного двигуна; 9 – лінія гарячої мережевої води від утилізатора; 10 – конденсатор ТНУ; 11 – дросельний вентиль; 12 – водогрійний котел; 13 – теплові споживачі; 14 – мережевий насос системи теплофікації; 15 і 16 – лінія прямої та зворотної мережевої води відповідно; 17 і 18 – лінія підведення і відведення «холодного» теплоносія у випарник ТНУ;  $T_{пмв}$ ,  $T_{зmv}$  – температури прямої та зворотної мережевої води в системі теплопостачання відповідно;  $T_{тн}$  – температура мережевої води після підігріву в ТНУ

На рис. 4.7 показані закономірності зміни ексергетичного ККД  $\eta_e$ , коефіцієнта перетворення  $\phi$  і питомої витрати умовного палива  $B$ , кг/ГДж в залежності від температури прямої мережевої води для  $T_{зmv} = 55$  °С.

Залежності зміни основних показників ефективності роботи ТНУ з дизельним приводом компресора і утилізацією теплоти відхідних газів, які показані на рис. 4.7, подібні до залежностей роботи ТНУ з електроприводом

компресора..

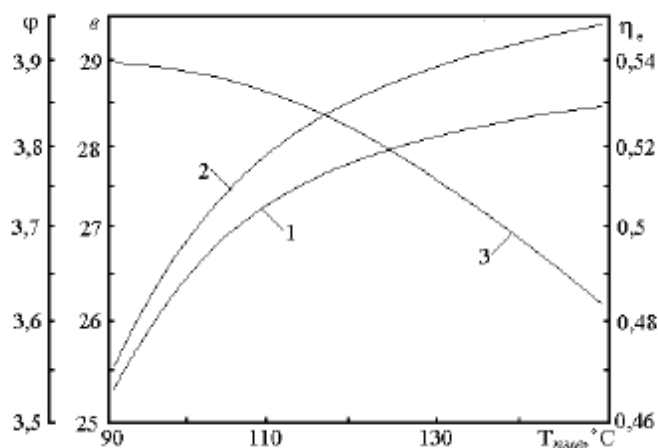


Рис. 4.7. Показники роботи ТНУ з дизельним приводом компресора:

1 – питома витрата в умовного палива в кг/ГДж; 2 – ексергетичний ККД  $\eta_c$ ; 3 – коефіцієнт перетворення  $\varphi$

Для режимів з більшими значеннями  $T_{пмв}$  підвищується оптимальне значення температури  $T_{тн}$ , що зумовлює зростання потужності компресора, збільшення витрати палива на його привод і зменшення коефіцієнта перетворення  $\varphi$ . Значення ексергетичного ККД ТНУ при цьому дещо підвищується, що пояснюється збільшенням значення ексергетичної температурної функції  $\eta_c = 1 - T_{нс}/T_{ср}$  (фактора Карно) внаслідок збільшення абсолютної середньотермодинамічної температури відпуску теплоти  $T_{ср}$  за умови незмінної температури навколишнього середовища  $T_{нс}$

Порівняльні безрозмірні показники ефективності роботи теплонасосних станцій, в складі яких працюють ТНУ з електроприводом і з дизельним приводом компресора, наведені на рис. 4.8.

$$\eta = \eta; \quad \eta^* = \eta_c / \eta_d,$$

де індексом «д» позначені величини для ТНС з дизельним двигуном, а індекс «е» – для ТНС з електроприводом компресора.

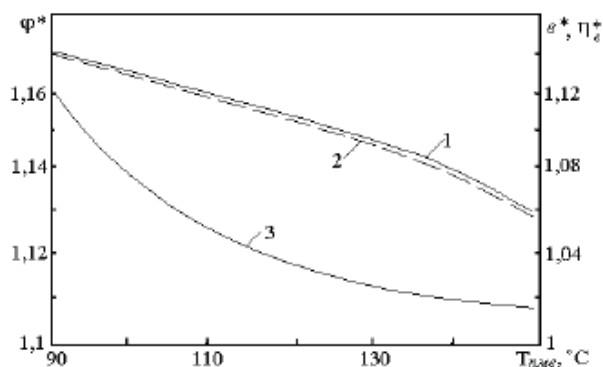


Рис. 4.8. Відносні показники ефективності роботи ТНС за умови  $T_{звб} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ :

1 – значення  $\beta^*$ ; 2 –  $\beta^*$ ; 3 –  $\phi^*$

Із рис. 4.8 видно, що показники роботи ТНС з дизельним приводом компресора кращі, ніж такі для ТНС з електроприводом компресора ТНУ. Ці показники зменшуються у міру зростання температури  $T_{пмв}$ , що пов'язано зі зменшенням частки завантаження ТНУ  $\beta$  і відповідно збільшенням частки завантаження водогрійних котлів (див. рис. 4.8).

На рис. 4.9 показані залежності додаткової економії умовного палива за рахунок впровадження ТНУ з дизельним приводом компресора і утилізацією теплоти відхідних газів від двигуна. Крива 1 характеризує економію палива в порівнянні з роботою ТНУ з електроприводом компресора, а крива 2 – економію палива в порівнянні з роботою водогрійної котельні.

Тут також наведено залежність зміни частки завантаження ТНУ (крива 3). Ці залежності свідчать про ефективнішу роботу ТНС з дизельним приводом компресора. Економія палива на таких ТНС може складати 21 %, тобто підвищена в порівнянні з роботою ТНС з електроприводом компресора на 7 %.

Це означає, що річна економія умовного палива в цьому випадку може бути збільшена до 7195 т. При цьому річна економія кисню збільшиться до

1286 м<sup>3</sup>, кількість викидів окису вуглецю і оксидів азоту зменшиться на 5,4 та 24,6 т відповідно, а кількість заощадженої за рік електроенергії на привод тягодуттєвих установок складатиме понад 124 МВт·год.

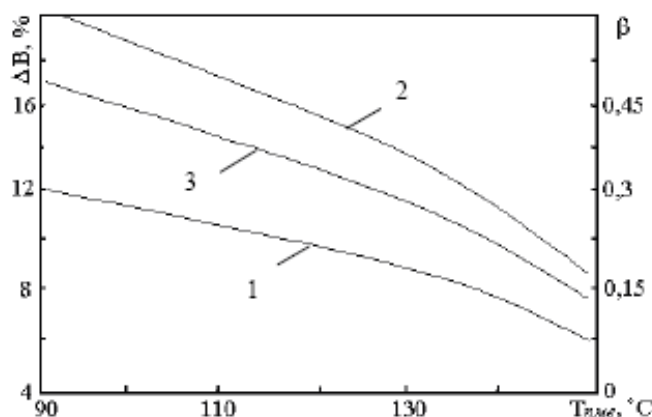


Рис. 4.9. Значення економії умовного палива  $\Delta B$  відносно роботи ТНС з електроприводом та частки навантаження ТНУ: 1 – економія палива на ТНУ; 2 – на ТНС; 3 – зміна частки навантаження ТНУ

На підставі викладеного вище можна зробити такі висновки:

1. Ефективність роботи теплонасосних установок з дизельним приводом компресора вища за ефективність роботи ТНУ з електроприводом завдяки утилізації теплоти відхідних газів після двигуна.

2. Застосування теплонасосних станцій з дизельними двигунами зумовлює економію палива в порівнянні з водогрійними котельнями на 21 %.

3. Економія палива спричиняє зменшення витрат кисню на процеси горіння палива, зменшення шкідливих викидів в атмосферу і зменшення витрат електроенергії на тягодуттєві установки водогрійних котлів.

4. Для ТНС з паралельним включенням конденсаторів оптимальні температури підігріву води в ТНУ складають 73–80 °С залежно від режиму роботи. Оптимальна частка навантаження ТНУ для цієї схеми складає  $\beta = 0,45\text{--}0,25$ .

5. Застосування послідовної схеми включення конденсаторів ТНС дозволяє здійснити підігрів теплофікаційної води в конденсаторах на більшу величину. Для такої схеми ТНС оптимальні температури підігріву води в ТНУ складають 80–85 °С залежно від режиму роботи. Оптимальна частка навантаження ТНУ в цьому випадку складає  $\beta = 0,7-0,6$ .

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

#### 5.1. Загальні положення з забезпечення теплоізоляційних і експлуатаційних показників будівельних виробів

Для зовнішніх огорожувальних конструкцій опалюваних будинків та споруд і внутрішніх міжквартирних конструкцій, що розділяють приміщення, температури повітря в яких відрізняються на 3 °С та більше, обов'язкове виконання умов:

$$R_{\Sigma \text{ пр}} \geq R_{q \text{ min}}, \quad (5.1)$$

$$\Delta t_{\text{пр}} \leq \Delta t_{\text{сг}}, \quad (5.2)$$

$$\tau_{\text{в min}} > t_{\text{min}}. \quad (5.3)$$

де  $R_{\Sigma \text{ пр}}$  – приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції (для термічно однорідних огорожувальних конструкцій визначається опір теплопередачі), приведений опір теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$R_{q \text{ min}}$  – мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції, мінімальне значення опору теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$\Delta t_{\text{пр}}$  – температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, °С;

$\Delta t_{cr}$  – допустима за санітарно-гігієнічними вимогами різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, °С;

$\tau_{vmin}$  – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, °С;

$t_{min}$  – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні при розрахункових значеннях температур внутрішнього й зовнішнього повітря, °С.

Мінімально допустиме значення,  $R_{q\ min}$ , опору теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій, світлопрозорих огорожувальних конструкцій і дверей житлових і громадських будинків встановлюється залежно від температурної зони експлуатації будинку.

Питомі тепловитрати на опалення будинків повинні відповідати умові

$$q_{буд} \leq E_{max}. \quad (5.4)$$

де  $q_{буд}$  – розрахункові або фактичні питомі тепловитрати;  $E_{max}$  – максимально допустиме значення питомих тепловитрат на опалення будинку за опалювальний період, кВт·год/м<sup>2</sup> або кВт · год/м<sup>3</sup>, що встановлюється залежно від призначення будинку, його поверховості, та температурної зони експлуатації будинку.

Параметри тепловологісного режиму приміщень будинків та споруд наведені в таблицях 5.1 - 5.3.

Таблиця 5.1

Градація вологісного режиму приміщень

Вологісний режим	Вологість внутрішнього повітря, $\varphi_v$ , %, при температурі $t_v$		
	$t_v \leq 12\ ^\circ\text{C}$	$12 < t_v \leq 24\ ^\circ\text{C}$	$t_v > 24\ ^\circ\text{C}$
Сухий	$\varphi_v < 60$	$\varphi_v < 50$	$\varphi_v < 40$
Нормальний	$60 \leq \varphi_v \leq 75$	$50 \leq \varphi_v \leq 60$	$40 \leq \varphi_v \leq 50$
Вологий	$75 < \varphi_v$	$60 < \varphi_v \leq 75$	$50 < \varphi_v \leq 60$
Мокрий	–	$75 < \varphi_v$	$60 < \varphi_v$

Таблиця 5.2

Розрахункові значення температури й вологості повітря приміщень

Призначення будинку	Розрахункова температура внутрішнього повітря, $t_{в}$ , °С	Розрахункове значення відносної вологості, $\phi_{в}$ , %
Житлові будинки	20	55
Громадські і адміністративні будинки	20	60
Лікувальні й дитячі навчальні установи	21	50
Дошкільні установи	22	50

Таблиця 5.3

Розрахункові температури зовнішнього повітря

Температурна зона	I	II	III	IV
Розрахункова температура зовнішнього повітря, °С	мінус 22	мінус 20	мінус 18	мінус 12

Опір теплопередачі термічно однорідної непрозорої огорожувальної конструкції розраховується за формулою:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{i p}} + \frac{1}{\alpha_{з}}. \quad (5.5)$$

де  $\alpha_{в}$ ,  $\alpha_{з}$  – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції, Вт/(м<sup>2</sup> · К), які приймаються згідно з додатком Е;  $\lambda_{i p}$  – теплопровідність матеріалу  $i$ -го шару конструкції в розрахункових умовах експлуатації (згідно з додатком Л), Вт/(м · К);

Приведений опір теплопередачі термічно неоднорідної непрозорої огорожувальної конструкції розраховується за формулою:

$$R_{\Sigma np} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_{j=1}^J \frac{R_j F_j}{F_{\Sigma}} + \frac{1}{\alpha_{з}}. \quad (5.6)$$

де  $R_j$  – термічний опір термічно однорідної зони, що визначається експериментально або на підставі результатів розрахунків двомірного (тримірного) температурного поля й розраховується за формулою

$$R_j = \frac{\bar{\tau}_{вj} - \bar{\tau}_{зj}}{q_j} . \quad (5.7)$$

де  $\bar{\tau}_{вj}, \bar{\tau}_{зj}$  – середні температури внутрішньої і зовнішньої поверхні термічно однорідної зони,  $^{\circ}\text{C}$ , відповідно;

$q_j$  – щільність теплового потоку через термічно однорідну зону,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$F_j$  – площа  $j$ -ї термічно однорідної зони,  $\text{м}^2$ ;

$F_{\Sigma}$  – площа огорожувальної конструкції,  $\text{м}^2$ .

Для конструкцій з визначеними значеннями лінійного коефіцієнту теплопередачі теплопровідних включень,  $k_j$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , приведений опір теплопередачі розраховується за формулою:

$$R_{np} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\Sigma i}} F_i + \sum_{j=1}^m k_j L_j} \quad (5.8)$$

де  $k_j$  – лінійний коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $j$ -го теплопровідного включення, для конструкцій, значення цього показника визначаються за результатами розрахунків двомірних (тримірних) температурних полів;

$L_j$  – лінійний розмір,  $\text{м}$ ,  $j$ -го теплопровідного включення за внутрішньою поверхнею термічно неоднорідної огорожувальної конструкції.

## 5.2. Визначення теплової потужності об'єкту проектування

Житловий будинок (об'єкт проектування) розташований на території с. Бурти Обухівського району Київської області.

Вихідні дані для розрахунку:

- розрахункові параметри зовнішнього повітря в районі розташування будинків (табл. 5.4);

- призначення приміщення;
- геометричні параметри будівельної споруди;
- тип опалювальних приладів – „тепла підлога”;
- температурний режим в системі опалення – 45...35 °С;

Вирішення питання про доцільність впровадження ТПУ базується на комплексному техніко-економічному аналізі багатьох факторів, в першу чергу, теплової ефективності зовнішніх огорожень існуючої будівлі. Розрахунок теплонавантаження існуючою будівлі, проведений в повному обсязі, дозволяє не тільки прийняти правильні рішення про вибір конкретної котельної установки, а й зіставити основні складові теплотехнічного комплексу реконструйованої будівлі з діючими нормативними показниками енергоефективного впровадження матеріалів та устаткування.

Згідно норм проектування систем опалення [8-10] розрахунок теплових втрат приміщень житлового будинку виконуємо за параметром Б для холодного періоду року (табл. 5.4).

Температуру внутрішнього повітря кожного приміщення вибираємо згідно санітарно-гігієнічних норм в залежності від призначення приміщення (;житлова кімната, кухня, ванна кімната і т.п.).

Таблиця 5.4

Розрахункові параметри зовнішнього повітря при проектуванні систем опалення та вентиляції будівель для Обухівського району Київської області [8]

Найменування параметру	Період року	
	теплий	холодний
Географічна широта, град. с. ш.	51	
Барометричний тиск, ГПа	990	
Зона клімату	нормальна	

## Продовження таблиці 5.4

Тривалість опалювального періоду, доба	187	
Середня температура за опалювальний період, °С	-1,1	
Кількість градусо-днів опалювального періоду S	3572	
Параметр А:		
– температура, °С	23,7	-10
– тепломісткість, кДж/кг	53,6	-6,7
– швидкість вітру, м/с	1,0	5,3
Параметр Б:		
– температура, °С	28,7	-22
– тепломісткість, кДж/кг	56,1	-20,7
– швидкість вітру, м/с	1,0	4,2

Теплові втрати через огорожувальні конструкції розрахуємо за таких технічних характеристик існуючої житлової будівлі:

- габарити будівлі (за зовнішніми замірами):  $10,2 \times 7,3 = 74,5 \text{ м}^2$  ;
- зовнішні несучі огорожувальні конструкції: кладка у 1,5 звичайні цеглини з зовнішньою та внутрішньою штукатуркою;
- стеля дерев'яна з накатом з пластин і утеплювачем – шлаком з пароізоляцією (один прошарок рубероїду) та утеплювачем (мінеральна вата);
- підлога: керамзитобетон з паркетною кльопкою та утеплювачем (шлаком);
- віконні блоки: з подвійним склінням, площа блоку –  $1,15 \text{ м}^2$ , кількість блоків – 8 штук.

План приміщень об'єкту проектування показаний на рис. 1.1, основні

теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій житлової будівлі (існуюча споруда) – в табл. 5.5.

Розрахункові теплові втрати будівлі  $Q_1$ , кВт, визначаються за формулою[8]

$$Q_1 = Q_a + Q_b, \quad (5.9)$$

де  $Q_a$ , кВт – теплові втрати через огорожувальні конструкції;  $Q_b$  кВт – теплові втрати на нагрів інфільтраційного повітря.

Теплові втрати  $Q_{т.втр.}$ , кВт, розраховуються для кожної огорожуючої конструкції приміщення за формулою

$$Q_a = \frac{1}{R} \cdot A \cdot (t_b - t_o) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n \cdot 10^{-3}, \quad (5.10)$$

де  $A$ , м<sup>2</sup> – площа поверхні огорожувальної конструкції;

$R$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт – термічний опір конструкції;

$t_b$ ,  $t_o$  – розрахункові температури внутрішнього та зовнішнього повітря;

$n$  – коефіцієнт, який залежить від положення зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції по відношенню до зовнішнього повітря; визначається за даними [10];

$\beta$  - додаткові теплові втрати (у відсотках до основних теплових втрат), які враховуються для зовнішніх вертикальних та похилих поверхонь згідно таблиці 3 [10].

Таблиця 5.5

Теплотехнічні характеристики огорджувальних конструкцій житлової будівлі  
(існуюча споруда)

Найменування та умовне позначення огорджувальної конструкції та її складові	Параметри	
	Загальна товщина, мм	Термічний опір $R_o$ , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$
Зовнішня стіна (ЗС): – кладка в 1,5 цегли звичайної на важкому цементному розчині – внутрішня штукатурка $\delta = 15$ мм	400	0,654
Стеля (СТ) дерев'яна з накатом з пластин і утеплювачем – шлаком: – пластини $\delta = 80$ мм – змазка $\delta = 20$ мм – штукатурка $\delta = 20$ мм – пароізоляція – утеплювач – шлак $\delta = 200$ мм	~ 350	1,255
Підлога (ПЛ): – паркетна кльопка $\delta = 17$ мм – асфальт на бетонній стяжці $\delta = 65$ мм – утеплювач – шлак $\delta = 250$ мм – залізобетона плита $\delta = 35$ мм	~ 680	1,625
Вікно (ВП): – подвійне скління – дерев'яна коробка	50	0,344
Двері зовнішні подвійні (ДП):	100	0,430

Термічний опір огороження  $R$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , визначається для кожної конструкції як сума

$$R = R_3 + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_B, \quad (5.11)$$

де  $R_3, R_B, (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$  – термічні опори тепловіддачі від зовнішньої та до внутрішньої поверхонь конструкції;

$\delta_i, м$  – товщина прошарку;

$\lambda_i, Вт/(м \cdot К)$  – теплопровідність матеріалу прошарку;  $n$  – кількість прошарків у будівельній конструкції.

Втрати теплоти через неутеплену підлогу визначаються за окремими зонами – смугами шириною 2 м, паралельними зовнішнім стінам.

Сумарні втрати через підлогу  $Q_{\Pi}, кВт$ , розраховуються за формулою

$$Q_{\Pi} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} (t_B - t_o) \cdot 10^{-3}, \quad (5.12)$$

де  $F_i, м^2$  – площа однієї зони;

$R_i, (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$  – опір теплопередачі відповідних зон; для першої зони  $R = 2,1 (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ , для другої –  $R = 4,3 (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ , для третьої –  $R = 8,6 (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ , для решти підлоги –  $R = 14,2 (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ ;

$n$  – кількість зон.

Теплові втрати  $Q_B, кВт$ , розраховуються для кожного приміщення з вікнами за формулою

$$Q_B = 0,337 \cdot A_{\Pi} \cdot h \cdot (t_B - t_o) \cdot 10^{-3}, \quad (5.13)$$

де  $A_{\Pi}, м^2$  – площа підлоги приміщення;  $h, м$  – відстань від підлоги до стелі.

Вихідні дані для розрахунку теплових втрат приміщень для існуючих огорожувальних конструкцій житлового будинку (тип та складові огорожувальних поверхонь, їх геометричні розміри, орієнтація конструкцій по відношенню до сторін світу) наведені в таблиці 5.6,

У підсумку для одноповерхової житлової споруди маємо:

- загальна площа споруди –  $10,2 \times 7,3 = 74,5 \text{ м}^2$  (за зовнішніми замірами);
- зовнішні несучі огорожувальні конструкції: кладка у 1,5 звичайні цеглини з зовнішньою та внутрішньою штукатуркою (термічний опір конструкції  $R = 0,654 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ )
- теплові втрати будівлі через огорожувальні конструкції –  $Q_{\text{т.втр.}} = 8,877 \text{ кВт}$ ;

Результати розрахунків свідчать, що теплозахисний стан існуючих зовнішніх конструкцій (найбільш відповідальних в балансі теплових втрат споруди) не відповідають діючим в Україні нормам з енергозаощадження: відповідний діючий нормативний показник для І кліматичної зони, до якої належить Обухівський район дорівнює  $R_0^{\text{норм}} \cong 4,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ , тобто, практично в 6 разів більший.

Такий теплозахисний стан зовнішніх конструкцій обумовлює, відповідно, й завищений рівень теплової потужності системи опалення споруди в цілому.

Для реконструкції зовнішньої огорожувальної конструкції житлового будинку найбільш підходить спосіб утеплення з нанесенням теплозахисного покриття на зовнішній поверхні стін. При цьому зберігаються внутрішні площі та виключаються проблеми, пов'язані з конденсацією вологи, оскільки конструкції існуючої стіни залишаються сухими.

Таблиця 5.6

Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій житлової будівлі  
(існуюча споруда)

№	Призначення приміщення	$t_{\text{вн}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вн}} - t_{\text{о}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Найменування огороження	Позначення	Орієнтація по сторонах світу	Лінійні розміри, м	Площа, $\text{м}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Опалювальні приміщення								

## Продовження таблиці 5.6

1 – 1	Житлова кімната	18	40	Зовнішня стіна	ЗС	ПД–ЗХ	3,5 x 3,0	10,5
				Зовнішня стіна	ЗС	ПД–СХ	4,3 x 3,0	12,9
				Підлога	ПЛ	–	4,1 x 3,2	13,1
				Стеля	СТ	–	4,1 x 3,2	13,1
				Вікно подвійне	ВП	ПД–ЗХ	0,85 x 1,35	1,15
				Вікно подвійне	ВП	ПД–СХ	0,85 x 1,35	1,15
1 – 2	Житлова кімната	18	40	Зовнішня стіна	ЗС	ПД–ЗХ	3,4 x 3,0	10,5
				Зовнішня стіна	ЗС	ПН–ЗХ	4,3 x 3,0	12,9
				Підлога	ПЛ	–	4,1 x 3,1	12,71
				Стеля	СТ	–	4,1 x 3,1	12,71
				Вікно подвійне	ВП	ПД–ЗХ	0,85 x 1,35	1,15
				Вікно подвійне	ВП	ПН–ЗХ	0,85 x 1,35	1,15
1 – 3	Житлова кімната	18	40	Зовнішня стіна	ЗС	ПД–СХ	3,1 x 3,0	9,3
				Підлога	ПЛ	–	2,7 x 2,9	7,83
				Стеля	СТ	–	2,7 x 2,9	7,83
				Вікно подвійне	ВП	ПД–СХ	0,85 x 1,35	1,15
1– 4 1– 5	Кухня Ванна кімната	15	40	Зовнішня стіна	ЗС	ПН–ЗХ	5,1 x 3,0	15,3
				Зовнішня стіна	ЗС	ПН–СХ	3,4 x 3,0	10,2
				Підлога	ПЛ	–	4,9 x 3,2	15,7
				Стеля	СТ	–	4,9 x 3,2	15,7
				Вікно подвійне	ВП	ПН–ЗХ	0,85 x 1,35	1,15
				Вікно подвійне	ВП	ПН–СХ	0,85 x 0,50	0,425
1– 6	Коридор	15	40	Зовнішня стіна	ЗС	ПН–СХ	3,5 x 3,0	10,5
				Зовнішня стіна	ЗС	ПД–СХ	2,0 x 3,0	6,0
				Підлога	ПЛ	–	3,3 x 1,8	5,94
				Стеля	СТ	–	3,3 x 1,8	5,94
				Вікно подвійне	ВП	ПН–СХ	0,85 x 1,35	1,15
				Двері подвійні	ДП	ПН–СХ	1,8 x 0,80	1,44

В якості утеплювача можна запропонувати пінобетон, технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

## Теплотехнічні характеристики пінобетону

Параметр	Од. вим.- ння	Значення
Густина	кг/м <sup>3</sup>	400
Теплопровідність у сухому стані	Вт/(м·К)	0,09
Теплопровідність в умовах експлуатації “Б”	Вт/(м·К)	0,120
Міцність на стиск	кг/см <sup>2</sup>	12

Розрахуємо термічний опір огорожувальної конструкції після реконструкції  $R_o^{yt}$ ,  $(m^2 \cdot K)/W$ , за формулою

$$R_o^{yt} = R_o^{ich} + \frac{\delta_{\text{ц}}}{\lambda_{\text{ц}}} + \frac{\delta_{\text{пн}}}{\lambda_{\text{пн}}} + \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}}, \quad (5.14)$$

де  $R_o^{ich}$ ,  $(m^2 \cdot K)/W$  – термічний опір існуючої огорожувальної конструкції;

$\delta_{\text{ц}}$ ,  $\delta_{\text{пн}}$ ,  $\delta_{\text{шт}}$ , м – товщина прошарків цементного розчину, плити з пінобетону та штукатурки, відповідно;

$\lambda_{\text{ц}}$ ,  $\lambda_{\text{пн}}$ ,  $\lambda_{\text{шт}}$ ,  $W/(m \cdot K)$  – теплопровідність прошарків цементного розчину, плити з пінобетону та штукатурки, відповідно.

Після розрахунку за вихідними даними маємо  $R_o^{yt} \approx 3,94 (m^2 \cdot K)/W$ , тобто, запропоновані заходи дозволять довести теплозахисний стан зовнішніх стін до нормативних значень.

За вищевказаною методикою розрахуємо теплові втрати житлової споруди після утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій.

Таким чином, для житлового будинку після реконструкції зовнішніх огорожувальних конструкцій маємо:

- загальна площа споруди –  $10,4 \times 7,5 = 78,0 \text{ м}^2$  (за зовнішніми замірами);
- зовнішні несучі огорожувальні конструкції: кладка у 1,5 звичайні цеглини з зовнішнім утеплювачем (пінобетоном) товщиною 200 мм та зовнішньою і внутрішньою штукатуркою (термічний опір конструкції  $R = 3,94 (m^2 \cdot K)/W$ );
- теплові втрати будівлі –  $Q_1 = 6,11 \text{ кВт}$ ;

Порівняння теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій

будівлі показує, що завдяки утепленню теплові втрати будівлі зменшилися майже в 1,8 раз.

Теплове навантаження системи опалення житлового будинку розрахуємо згідно діючих норм проектування систем опалення [8-10].

Теплова потужність системи опалення визначається за формулою

$$Q_o = (Q_1 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 - Q_3) + Q_2, \quad (5.15)$$

де  $Q_1$  – теплові втрати приміщення, кВт;

$\beta_1$  – коефіцієнт, який залежить від типу опалювального приладу; приймається за даними [10];

$\beta_2$  – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати теплоти зарадіаторними ділянками зовнішніх стін; приймається за даними [10];

$Q_2$  – втрати теплоти, кВт, трубопроводами опалення, які прокладаються в неопалювальних приміщеннях розрахункової споруди. Втрати  $Q_2$  не повинні перевищувати 4% від величини тепловтрат  $Q_1$ ;

$Q_3$  – тепловий потік, кВт, який регулярно надходить від освітлення, обладнання та людей.

Згідно розрахунків після утеплення зовнішніх огорожувальних стін будинку

$$Q_1 = 6,11 \text{ кВт.}$$

Для сталевих панельних радіаторів, які встановлені біля зовнішньої стіни під світловим прорізом, приймаємо

$$\beta_1 = 1.05, \beta_2 = 1.04.$$

Згідно рекомендацій [9], величину  $Q_3$  для житлових будинків слід приймати з розрахунку 0,01 кВт на м<sup>2</sup> загальної площі.

Для проектувального будинку маємо

$$Q_3 = 0,01 \cdot 78 = 0,78 \text{ кВт.}$$

В житловому будинку неопалювальним приміщення, де прокладаються трубопроводи опалення, є приміщення технічного підвалу (рис. 1.1). Згідно плану реконструкції будівлі, в цьому приміщенні планується встановлення обладнання.

Трубопроводи системи опалення в межах технічного приміщення проектуємо неізолюваними. Втрати теплоти неізолюваними трубопроводами використовуються для підтримання комфортної температури всередині приміщення в холодний період року.

Втрати теплоти  $Q_2$ , кВт, трубопроводами, які розташовані в неопалювальному технічному приміщенні, визначаємо за формулою

$$Q_2 = \sum L \cdot q_{\text{л}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.16)$$

де  $L$  – довжина ділянок неізолюваних трубопроводів з різними діаметрами, м;  
 $q_{\text{л}}$  – лінійний питомий тепловий потік неізолюваних трубопроводів, Вт/м.

Згідно даних [9], для неізолюваних горизонтальних трубопроводів умовного діаметра 25 мм, які прокладені в неопалювальному технічному приміщенні, приймаємо:

$$q_{\text{л}}^{\text{п}} = 60 \text{ Вт/м};$$

$$q_{\text{л}}^{\text{з}} = 35 \text{ Вт/м},$$

де  $q_{\text{л}}^{\text{п}}$ ,  $q_{\text{л}}^{\text{з}}$ , Вт/м – лінійний питомий тепловий потік, відповідно, подавального та зворотного неізолюваних трубопроводів системи опалення.

Теплові втрати  $Q_2$  трубопроводами загальною довжиною 5 м дорівнюють:

$$Q_2 = 0,24 \text{ кВт} < 4 \% Q_1.$$

Розрахункова теплова потужність системи опалення проектувального об'єкту

$$Q_0 = 6,11 \cdot 1,05 \cdot 1,04 - 0,78 + 0,24 = 6,13 \text{ кВт}.$$

### 5.3. Вибір теплового насосу

Для визначення параметрів теплового насосу, в моновалентному режимі роботи, необхідно знати: режим роботи (вільний, вільний з відімкненням в години максимального навантаження електричної мережі, акумуляційний, з акумулюванням теплоти в години нічного зниження навантаження електричної мережі) теплового насоса, теплові втрати будівлі на опалення та прибавку на приготування гарячої води (в залежності від кількості жителів).

Розрахунок проводиться для житлового будинку у вільному режимі електроспоживання на опалення.

Для покриття даного теплового навантаження підходять два одноступінчаті розсолно-водяні теплові насоси провідних фірм виробників (табл..5.5)

Таблиця 5.18

#### Порівняльні характеристики теплових насосів

Виробник	Viessmann	Vaillant
Назва	Vitocal BWC 201A	VWS 61/2
Номінальна теплова потужність, кВт	5,64	5,9
Номінальна електрична потужність, кВт	1,27	1,4
Коефіцієнт перетворення енергії (коефіцієнт потужності)	4,46	4,3

З порівняльних характеристик теплових насосів наведених у таблиці 5.18 обираємо тепловий насос VWS 61/2 фірми Vaillant, оскільки хоча його коефіцієнт перетворення енергії нижчий за конкурента, але менша ціна та простота обслуговування роблять цей пристрій більш привабливим для покупця.

Будова теплового насоса geoTHERM VWS 61/2 показана на рис. 5.1 [24].

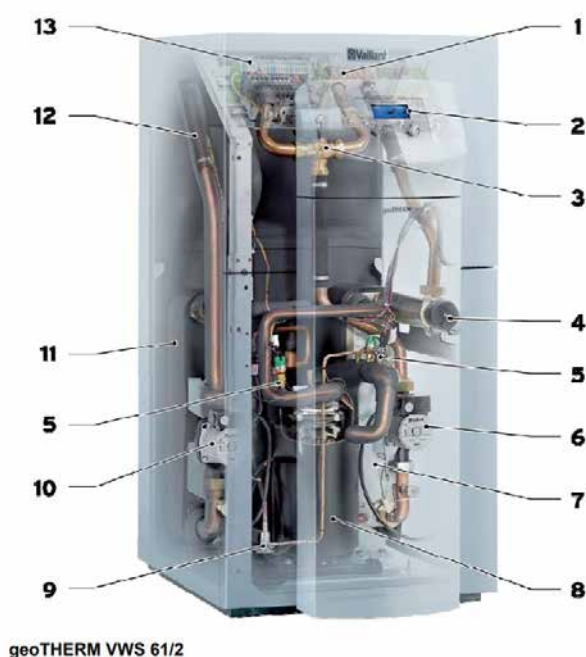


Рис.5.1. Будова теплового насоса geoTHERM VWS 61/2

- 1 плата регулятора
- 2 регулятор енергобалансу в залежності від погодних умов
- 3 перемикаючий клапан ГВ
- 4 додатковий електропідігрів
- 5 пресостат
- 6 циркуляційний насос опалювальної системи
- 7 конденсатор
- 8 спіральний компресор (Copeland ZH)
- 9 розширювальний клапан
- 10 циркуляційний насос для розсолу
- 11 випарник
- 12 гнучкі шланги
- 13 електричні з'єднання

Тепловий насос geoTHERM VWS серійно оснащений такими конструкційними компонентами:

- Циркуляційний насос для розсолу та компенсаційний резервуар для розсолу з SV
- Безпечний холодоагент R 407 C
- Сучасний, з великим терміном служби, спіральний компресор для теплових насосів
- Регулювання регулятора залежно від погоди енергобалансу з великим дисплеєм для графічного відображення
- Додатковий електропідігрів із можливістю регулювання на 2/4/6 kW
- Найкоротший час монтажу завдяки компактній конструкції
- Циркуляційний насос опалювальної системи
- Триходовий перемикаючий клапан для підготовки гарячої води води
- Високоякісний пластинчастий теплообмінник з нержавіючої сталі
- Підключення джерела тепла та опалювальної установки, що змінюється. системи.

Завдяки спеціальним обертовим з'єднувальним трубкам теплового насоса можливо приєднання як зверху, так і горизонтально.

Теплові насоси geoTHERM серійно оснащуються інтегрованим регулятором енергобалансу, керованого залежно від погодних умов.

Буферний бойлер забезпечує мінімальну циркуляцію та може компенсувати періоди обмежень мережі живлення і таким чином забезпечити сталість тепловіддачі

#### 5.4. Розрахунок строку окупності впровадження теплового насосу

Строк окупності впровадження теплового насосу для опалення житлового будинку розраховуємо згідно методиці, яка викладена в [20].

Строк окупності додаткових капітальних витрат визначається, як правило, у результаті техніко-економічного розрахунку, що виконується на основі проектних пророблень об'єкта, на якому передбачається використання теплового насоса.

Економія експлуатаційних витрат на енергоносії  $E$ , грн/рік, при застосуванні теплового насоса може бути обчислена по формулі

$$E = q \cdot \left( \frac{T_T}{\eta} - \frac{T_E}{\varepsilon} \right), \quad (5.17)$$

де  $q$  – кількість кВт·год. теплової енергії, яка необхідна для опалення будинку протягом одного опалювального періоду;  $T_E$  – тариф на електричну енергію;  $T_T$  – тариф на один із традиційних енергоносіїв;  $\varepsilon$  - коефіцієнт перетворення теплового насоса;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії традиційного генератора тепла

Величину  $q$  можна визначити за формулою:

$$q = \frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot N \cdot S}{t_b - t_3}, \quad (5.18)$$

де  $N$  – теплова потужність, Вт, опалювальної системи;  $S$  – число градусо-днів опалювального періоду;  $t_b - t_3$  – розрахункова різниця температур внутрішнього й зовнішнього повітря.

Для Київської обл.  $S = 3572$  градусо-діб, внутрішня температура приміщення  $t_b = 18$  °С, середня температура опалювального сезону  $t_s = -0,6$  °С

$$\text{Тоді } q = \frac{10^{-3} \cdot 24 \cdot 5,9 \cdot 3572}{18 + 0,6} = 27,2$$

$K$ , грн. – одноразові капітальні витрати на придбання й установку теплового насоса – можуть бути попередньо оцінені як його ринкова вартість

$$K = 208 \text{ тис. грн}$$

Простий строк окупності  $C$ , років, може бути визначений за формулою:

$$C = \frac{K}{E} = \frac{K}{q \cdot \left( \frac{T_T}{\eta} - \frac{T_E}{\varepsilon} \right)}. \quad (5.21)$$

При діючих тарифах на енергоносії в Україні на 2024 рік, а саме:  $T_T = 1,42$  грн./кВт год;  $T_E = 4,32$  грн./кВт·год строк окупності впровадження теплової помпи для будівлі, що проектується:

$$C = \frac{K}{E} = \frac{208}{27,2 \cdot \left( \frac{1,42}{0,9} - \frac{4,32}{4,3} \right)} = 13 \text{ років.}$$

Зменшити термін окупності ТНУ можна за допомогою використання енергії Сонця. Наприклад, якщо використовувати для привода компресора електроенергію, вироблену мережевою власною фотовольтаїчною станцією.

## ВИСНОВКИ

Об'єктом магістерської роботи є житлова будівля, що входить до складу ВСП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція».

В розділі 1 наведено загальні дані фермерського господарства та сформульовані основні задачі магістерської роботи. Надані основні положення із забезпечення теплоізоляційних і експлуатаційних показників будівельних виробів.

В розділі 2 проаналізовані особливості сучасного стану впровадження теплових насосів у промислових та комунально-побутових об'єктах.

Отримані теоретичні й практичні результати свідчать про високу енергетичну й економічну ефективність застосування теплонасосної техніки в умовах України. Найбільше просто й ефективно з економічної точки зору в існуючі системи теплопостачання можуть бути інтегровані ТНУ, що використовують теплоту рідких стоків промислових і побутових об'єктів.

В розділі 3 проаналізовано узагальнену теплотехнологічну систему з теплонасосною установкою. Зокрема розглянуто питання:

- 1) використання альтернативних холодоагентів для ТН для заміни озonoактивних фреонів, а також екологічні аспекти застосування ТН;
- 2) впровадження ТН в кліматичних умовах України;
- 3) впровадження ТН на промислових підприємствах;
- 4) можливість використання ВЕР для виробництва теплоти у ТН;
- 5) можливість впровадження ТН в систему централізованого теплопостачання;
- 6) оцінка енергетичних та економічних показників систем з ТН.

Питання ефективності теплонасосних станцій в системах тепlopостачання аналізуються в розділі 4. Приділено увагу особливостям роботи ТНУ з електрприводом та дизельним приводом компресора.

В розділі 5 визначена теплова потужність об'єкту проектування – житлового одноповерхового будинку площею 78 м<sup>2</sup>.

Результати розрахунків неутепленої будівлі свідчать, що теплозахисний стан існуючих зовнішніх конструкцій (найбільш відповідальних в балансі теплових втрат споруди) не відповідають діючим в Україні нормам з енергозаощадження: відповідний діючий нормативний показник для кліматичної зони Васильківського району дорівнює  $R_o^{\text{норм}} \cong 4,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ , тобто, практично в 6,0 разів більший.

Такий теплозахисний стан зовнішніх конструкцій обумовлює, відповідно, й завищений рівень теплової потужності системи опалення споруди в цілому.

Для реконструкції зовнішньої огороджувальної конструкції житлового будинку найбільш підходить спосіб утеплення з нанесенням теплозахисного покриття на зовнішній поверхні стін. При цьому зберігаються внутрішні площі та виключаються проблеми, пов'язані з конденсацією вологи, оскільки конструкції існуючої стіни залишаються сухими. В якості утеплювача запропонований пінобетон товщиною 200 мм.

Після розрахунку за вихідними даними маємо  $R_o^{\text{yt}} \approx 3,94 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ , тобто, запропоновані заходи дозволять довести теплозахисний стан зовнішніх стін до нормативних значень.

Порівняння теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій будівлі показує, що завдяки утепленню теплові втрати будівлі зменшились майже в два рази.

Розрахунок та вибір теплового насосу для об'єкту проектування проводився для ТПУ у вільному режимі електроспоживання на опалення.

Для покриття даного теплового навантаження об'єкту проектування вибрана одноступінчата паракомпресорна розсольно-водяна тепла помпа типу VWS 61/2 теплової потужності 5,9 кВт фірми-виробника „Vaillant ” (Німеччина).

При діючих тарифах на енергоносії в Україні на 2024 рік строк окупності впровадження теплової помпи для будівлі, що проектується, складає 13 років.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетичну ефективність»  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text>
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії»  
[https://ips.ligazakon.net/document/view/t030555?ed=2019\\_07\\_11](https://ips.ligazakon.net/document/view/t030555?ed=2019_07_11)
3. Ришард Титко. Відновлювані джерела енергії (Досвід Польщі для України). //Ришард Титко, Володимир Калініченко. - Варшава, 2010. - 533 с.
4. Корчемний М. та інш. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. – Тернопіль: 2001 .-984 с/
5. В. С. Самохвалов. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження. Навч. посібник. – К.: Вид-во "Центр учбової літератури". – 2008. – 178с.
6. Рэй Д. Тепловые насосы / Д. Рэй, Д. Макмайлк; пер. с англ. – М. : Энергоиздат. – 1982. – 224 с.
7. Єнін П.М., Швачко Н.А. Теплопостачання (частина I «Теплові мережі та споруди»). Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2007. – 244 с.
8. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 . Будівельна кліматологія – К.: Мінбуд України, 2011. – 127 с.
9. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. - Київ: Мінрегіонбуд України, - 2009. – 56
10. ДБН В.2.6-31:2016 Теплова ізоляція будівель.
11. Галай А. Помпи тепла. Історія. Реальність. Практика і помилки / А. Галай // Ринок інсталяційний. – 1998. – №11. – С. 25.
12. Стратегія теплозабезпечення населених пунктів України (до обговорення проекту Енергетичної стратегії України на період до 2035 р.) // Вісник НАН України. 2015. № 4. С. 98–105.

13. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання: монографія ЮФ Снежкін, ДМ Чалаєв, ВС Шаврін, НО Дабіжа - НАН України АА Долінського, 2008
14. Тепловий насос: історія, функціонал, перевагик: <https://termal.ua/ua/teplovyyj-nasos-istoriia-funktsional-perevahy/>
15. Фиалко Н. М. Утилизация энергии выбросов систем местной вентиляции метрополитенов с помощью тепловых насосов / Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Дубовской С. В. // Пром. теплотехника. – 2000. – Т.22, №1. – С. 90–93. 156
16. Мацевитый Ю.М., Богданович Л.С., Клепанда А.С., Чиркин Н.Б. О внедрении в экономику Украины нетрадиционных источников теплоты на базе тепловых насосов. //Энергосбережение, энергетика, энергоаудит, 2007, №3.
17. Геотермальний тепловий насос: будова, принцип роботи, переваги та недоліки <https://teplosfera.com/blog/teplovi-nasosi/geotermalnyj-teplovyyj-nasos-budova-pryntsyp-roboty-perevagy-ta-nedoliky>
18. Як обрати тепловий насос <https://teplosfera.com/blog/teplovi-nasosi/yak-obraty-teplovyyj-nasos>
19. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання: монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 176 с.
20. Гершкович В.Ф. – Особенности проектирования систем энергоснабжения зданий с тепловыми насосами. – Киев ЗНИИЭП, 2009. – 60 с.
21. .Б.Х.Драганов, В.В.Іщенко, О,В,Шеліманова. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем. К.:Аграрна освіта. 2017.-230 с.
22. Методичні вказівки до лабораторно-практичних робіт з дисципліни «Енергоощадність та альтернативні джерела енергії» для студентів денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр» / Уклад. Є.О. Антипов, О.В. Шеліманова. – Київ: РВВ НУБіП України, 2018. – 84 с.
23. Особливості проектування систем опалення з тепловими насосами.

<https://akvilonpro.ua/ua/ingenierie-proektu/teplovie-nasosi/osobennosti-proektirovaniya-otopleniya.html>

24. Тепловий насос Vaillant geoTHERM

<https://kotlovoy.com.ua/ua/p546703890-teplovoj-nasos-vaillant.html>

25. Шеліманова О.В. Гриценюк І.О., Самсоненко Ю.В.. Особливості інтеграції теплового насоса в систему опалення будівлі. Тези доповіді 2 Міжнародної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (теорія, практика, історія, освіта)»

[https://drive.google.com/file/d/1HS8p-UctNgJ\\_UHCIFoRfdAOc7TKwext1/view](https://drive.google.com/file/d/1HS8p-UctNgJ_UHCIFoRfdAOc7TKwext1/view)