

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко**

**ПАРОКОМПРЕСІЙНІ ТЕПЛОАСОСНІ  
УСТАНОВКИ В СИСТЕМАХ  
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

**Монографія**

Вінниця

ВНТУ

2009

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/488>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.577  
Т 23

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 24.04.2008 р.)

Рецензенти:

**О. В. Дорошенко**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Кошельник**, доктор технічних наук, професор

**Ткаченко, С. Й.**

Т 23 Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 176 с.

ISBN 978-966-641-309-6

В монографії розглядається підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання парокомпресійних теплонасосних установок в системах теплопостачання, визначення умов раціонального комбінування джерел теплопостачання і теплонасосних установок в системах теплопостачання, розробка методичних основ синтезу джерел теплопостачання з тепловими насосами.

Запропоновано комплексні методи визначення енергоефективності теплонасосних станцій в системах теплопостачання для різних схемних рішень та режимів роботи. Представлені рекомендації можуть бути використані для прогнозування умов ефективної інтеграції теплонасосних установок в системи теплопостачання.

УДК 621.577

ISBN 978-966-641-309-6

© С. Ткаченко, О. Остапенко, 2009

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	7
1. ТЕПЛОНАСОСНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ .....	9
1.1. Застосування ТНУ в світовій практиці .....	10
1.2. Технічні проблеми та економічні передумови застосування теплових насосів для опалення .....	18
1.3. Теплонасосні станції в системах теплопостачання .....	24
1.4. Застосування когенераційних технологій в теплонасосних джерелах теплопостачання .....	29
2. УЗАГАЛЬНЕНА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА З ТЕПЛОНАСОСНОЮ УСТАНОВКОЮ .....	36
2.1. Формалізована систематизація інформації з розробки, дослідження та впровадження теплонасосних установок .....	36
2.2. Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою .....	46
2.3. Структура досліджуваної теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою .....	59
3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК .....	62
3.1. Структурна схема та методика дослідження теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою ...	62
3.2. Математичний опис теплотехнологічної системи з теплонасосною установкою .....	66
3.3. Вибір холодоагенту для теплонасосних установок .....	92
3.4. Вплив температур підведення і відведення теплоти та температури навколишнього середовища на ефективність роботи ТНУ .....	97
3.5. Вплив схеми включення конденсаторів та випарників теплонасосних установок на ефективність роботи ТНУ у системі .....	104
4. ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ .....	109

4.1. Ефективність застосування ТНУ з електроприводом компресора на теплонасосних станціях .....	109
4.2. Ефективність застосування ТНУ з дизельним приводом компресора на теплонасосних станціях .....	116
4.3. Вплив топології теплонасосної станції на ефективність її роботи в системах тепlopостачання .....	121
4.4. Дослідження дійсних режимів роботи систем тепlopостачання .....	136
4.5. Ефективність застосування теплонасосних установок з приводом компресора від газотурбінної установки та утилізацією теплоти відхідних газів в топках водогрійних котлів .....	146
4.6. Аналіз комплексного впливу схем включення конденсаторів, виду приводу та режимів роботи ТНУ на показники ефективності роботи теплонасосних станцій .....	150
ЛІТЕРАТУРА .....	156

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ВЕР	вторинні енергоресурси;
ВК	– водогрійний котел;
ГТУ	– газотурбінна установка;
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання;
ДНТ	– джерела низькотемпературної теплоти;
ТЕЦ	– теплоелектроцентрально;
ТН	– тепловий насос;
ТНУ	– теплонасосна установка;
ТНС	– теплонасосна станція;
ХА	– холодоагент;
b	– питома витрата палива, кг/ГДж; кг/(кВт·год);
e	– питома ексергія, МДж/м <sup>3</sup> ; кДж/кг;
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);
E	– ексергія, МВт;
G	– масова витрата, кг/с;
H	– теплоперепад, кДж/кг;
N	– електрична потужність, МВт;
P	– тиск, МПа;
Q	– тепла потужність, МВт;
Q <sub>н</sub> <sup>p</sup>	– нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м <sup>3</sup> ;
Q <sub>ну</sub> <sup>p</sup>	– нижча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;
T	– температура, К
T <sub>сп</sub> <sup>B</sup>	– середньотермодинамічна температура теплоносія у випарнику, К;
T <sub>сп</sub> <sup>K</sup>	– середньотермодинамічна температура теплоносія в конденсаторі, К;

- $\beta$  – частка теплової потужності ТНУ у складі ТНС;
- $\varepsilon$  – холодильний коефіцієнт;
- $\eta$  – коефіцієнт корисної дії (ККД);
- $\eta_{\text{к}}^{\text{н}}$  – ККД-нетто котельні;
- $\eta_{\text{с}}^{\text{в}}$  – фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику;
- $\eta_{\text{к}}^{\text{в}}$  – фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі;
- $\Theta$  – величина недогріву, °С;
- $\lambda, \pi$  – міра підвищення тиску в компресорі;
- $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;
- $\varphi$  – коефіцієнт перетворення (опалювальний коефіцієнт).

#### 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 – котельня; 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 теплотехнологічних 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 теплотехнологічних систем підприємств України недостатніми є системні дослідження умов теплопостачання цих підприємств з використанням теплових насосів.

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

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

В монографії розглядається підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання парокомпресійних теплонасосних установок в системах теплопостачання; визначаються умови раціонального комбінування джерел теплопостачання і теплонасосних установок в системах теплопостачання, висвітлюються розроблені методичні основи синтезу джерел теплопостачання з тепловими насосами.

Запропоновано комплексні методи визначення енергоефективності теплонасосних станцій в системах теплопостачання для різних схемних рішень та режимів роботи. Представлені рекомендації можуть бути використані для прогнозування умов ефективної інтеграції теплонасосних установок в системи теплопостачання.



## 1. ТЕПЛОАСОСНІ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Принцип дії теплонасосної установки (ТНУ) полягає в здійсненні зворотного термодинамічного циклу легкокиплячою речовиною (холодоагентом). У випарнику ТНУ (рис. 1.1) 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.

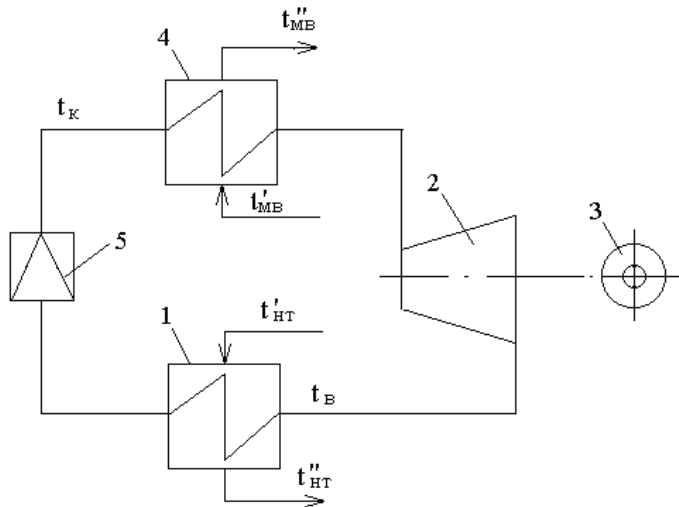


Рис. 1.1. Схема парокомпресійної ТНУ: 1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – дросель

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:

$$Q_k = Q_B + I_{KM} \cdot \quad (1.1)$$

Коефіцієнт перетворення енергії в ТНУ визначається з формули:

$$\varphi = \frac{Q_k}{I_{KM}} = \frac{(Q_B + I_{KM})}{I_{KM}} = \varepsilon + 1 > 1, \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon = Q_B / I_{KM}$  – холодильний коефіцієнт.

Формула (1.2) відображує той факт, що енергія, яка віддається споживачу, більша за енергію, яка витрачена на цикл –  $I_{KM}$ . Отже, використання низькотемпературної (скидної) енергії в ТНУ дає змогу економити енергоресурси. Застосування ТНУ для опалення запропонував ще Томсон.

### 1.1. 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 [1 – 7]. 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 [1, 2, 8].

1972 рік та до теперішнього часу – відродження інтересу до теплових насосів та різке зростання досліджень в усьому світі [8].

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) [1]. 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. [1, 2, 4]. 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 [1, 2, 4]. Зростаючий дефіцит паливно-енергетичного балансу змушує приділяти цьому питанню все більше уваги [4].

Перша опалювальна установка на базі холодильної машини була споруджена в 1927 році англійським інженером Холдейном у власному будинку в Шотландії [1, 4]. 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 повітро-повітряних теплових насосів. До 1963 року їх випуск збільшився з однієї тисячі до 76 тисяч одиниць за рік [4, 8].

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) [1, 2, 4]. 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) [4].

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 [1, 2].

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, 4].

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 [9–15].

Теплопродуктивність ТН змінюється від декілька сот ват до десятків мегават [16–21]. Теплові насоси дозволяють утилізувати низькотемпературну енергію практично будь-яких промислових або побутових теплових викидів [10, 11, 22–33]. Залучання 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 [34]. Теплові насоси, що реалізують прогресивну

енергозберігаючу технологію виробництва теплоти, дозволяють підняти на якісно новий рівень системи теплопостачання [13, 25, 35–49].

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 [50–57]. ТН знаходять застосування як в побутовому секторі і промисловості, так і в сільськогосподарському виробництві [58–61].

В побутовому секторі весь досвід розвитку теплових насосів, в першу чергу, відноситься до централізованого теплопостачання. Зазначались два основних напрямки: перший – теплопостачання однодворних 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 [62–67].

За кордоном все більше застосовуються так звані бівалентні опалювальні системи, що містять ТНУ та пікове джерело теплопостачання на газоподібному, рідкому або твердому паливі [2, 4, 7]. При одночасному використанні ще і сонячного колектора систему називають трикомпонентною (тривалентною) [4, 68]. 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 теплоджерелами [1, 4]. В значно менших масштабах теплові насоси подібного типу застосовуються в Канаді – 100 тис. штук [1, 8].

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 [8].

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 20 тис. установок [1, 2, 4, 8].

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) [1, 2, 69]. Як низькотемпературні джерела для цих станцій використовуються міські стічні води, промислові водяні стоки та морська вода [1, 2, 69].

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. Фредріксавн – 10 МВт), Швейцарії (м. Базель – 11 МВт).

Виробництвом обладнання для вказаних теплонасосних установок займається в основному фірма «Sulzer» у Швейцарії. Ця фірма виробляє ТН, що забезпечують теплопродуктивність в діапазоні 1 – 30 МВт [2].

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

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) [2, 7].

За масштабами застосування теплонасосних установок країни пострадянського простору значно відстають від розвинутих країн. Хоча дослідження в цій галузі здійснюються давно [1, 35, 70, 71], 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.

До основних факторів, що стримують широке впровадження ТНУ належать:

- незначне поширення систем кондиціонування повітря та електрообігріву;
- відсутність низькотемпературних систем опалення в децентралізованому теплопостачанні;
- відсутність серійного виробництва теплових насосів [72–78].

В країнах пострадянського простору експлуатується декілька дослідно-промислових теплонасосних установок, створених на базі серійних холодильних машин. В тому числі, найбільш великі – на Самтредській чайній фабриці (3,2 МВт) та в м. Ялті в пансіонаті «Дружба» (2,5 МВт) [9, 35].

Здійснена поставка двох головних зразків теплових насосів теплопродуктивністю по 9 МВт на Світогорський ЦПК. Джерело низькотемпературної теплоти – потоки механічно очищеної скидної води з температурою 30–35 °С. Теплота, що генерується ТН, використовується для підігріву підживлювальної води, що йде на поповнення втрат пари і конденсату та для гарячого водопостачання. При цьому підігрів здійснюється ступінчасто в пластинчастих теплообмінниках і далі в теплових насосах. Очікувана економія органічного палива – 6 тис. т. у. п. [72, 77, 79].

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 [72, 80-83].

В Україні Мелітопольський завод холодильного машинобудування, після перетворення в акціонерне товариство відкритого типу АТ «Рефма», зберіг свій основний профіль – виробництво фреонових сальникових та безсальникових холодильних компресорів, агрегатів та холодильних машин на їх базі, а також іншого холодильного обладнання в діапазоні холодопродуктивності на R22 від 5 до 50 кВт в стандартному режимі.

Велику питому вагу в нових розробках складають теплові насоси. Зокрема, виготовлені перші партії теплових насосів НТ-22 для сушіння пиломатеріалів; НКТ5 та НКТ10, що утилізують низькотемпературну теплоту трансформаторних підстанцій для отримання гарячої води.

На заводі впроваджена теплонасосна станція на базі холодильних машин ІМКТ28, що працюють на R142. Вона забезпечує душеві установки декількох цехів гарячою водою. Проходить випробування тепло-



вий насос НКВ60 типу «повітря-вода», розроблений за технічним завданням Кримського НВО «Геліотерм». Призначення цього теплового насоса – підтримувати необхідну температуру в приміщеннях санаторіїв, пансіонатів, будинків відпочинку, які не експлуатуються в зимовий період. Це дозволить з максимальними витратами електроенергії зберегти їх в робочому стані, уникнути додаткових витрат на ремонт.

Застосування теплових насосів вирішує проблему економії електроенергії в різних галузях народного господарства, і завод готовий реалізувати будь-які побажання замовників [16, 79, 84].

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 [71, 85–89].

Теплові насоси можна класифікувати за такими ознаками [7]:

- 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 ознакою «1» розрізняють: парокомпресійні, абсорбційні та термоелектричні ТН. Схеми застосування можуть бути моновалентні (тільки ТН) та бівалентні (ТН у сполученні з додатковим джерелом теплоти). Як ДНТ для ТН можуть бути використані: зовнішнє повітря; поверхневі води (ріка, став, море); підземні води; ґрунт; сонячна енергія; низькотемпературна теплота штучного походження (скидні води, нагріті продукти технологічних процесів, очищена вода станцій аерації, витяжне повітря систем вентиляції та ін.). При класифікації за ознакою «4» розрізняють такі основні варіанти: повітря-повітря; пові-

тря-вода; ґрунт-повітря; ґрунт-вода; вода-повітря; вода-вода. За ознакою «5» розрізняють ТН, що використовують для роботи електроенергії, 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 [72, 78].

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

## **1.2. Технічні проблеми та економічні передумови застосування теплових насосів для опалення**

У відповідності з «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року» (затвердженою розпорядженням Кабінету міністрів України №145-р від 15 березня 2006 р.) розвиток системи теплопостачання планується здійснювати шляхом поступового нарощування виробництва теплоти на базі електричних теплогенераторів (переважно – теплових насосів). Планується, що до 2030 р. об'єм виробництва теплової енергії електричними теплогенераторами (з використанням теплових насосів) збільшиться до 180 млн Гкал порівняно з 1,7 Гкал в 2005 р. Таким чином, «Енергетична стратегія...» визначила новий концептуальний підхід до теплопостачання житлово-комунального комплексу.

З використанням теплових насосів можна надійно вирішити питання теплопостачання міського комплексу та об'єктів, що розташо-

вані далеко від теплових комунікацій. Схеми з тепловими насосами універсальні та можуть застосовуватись в цивільному, промисловому та приватному будівництві.

В деяких регіонах України для опалення житлових та громадських будівель можуть застосовуватись теплові насоси. Однак, проектування та будівництво будівель з тепловими насосами стримується рядом причин технічного та економічного характеру [38, 75, 78, 90].

Не зважаючи на те, що в Україні є декілька підприємств холодильного машинобудування, серійне виробництво теплонасосного обладнання все ще розвинено недостатньо. Тому проектні організації не можуть застосувати комплекти вітчизняних теплових насосів, у той час як можливості застосування імпортової техніки обмежуються високими цінами на неї та виправданою обережністю замовників, що побоюються залишитись в морози без кваліфікованого сервісного обслуговування, що відповідало б рівню придбаній ними техніки.

Вартість теплових насосів висока у порівнянні з вартістю традиційних теплогенераторів. Однак, економічні перешкоди на шляхах впровадження пристроїв, що використовують енергію навколишнього середовища, не будуть видаватися такими ж нездоланими як зараз, у міру зростання цін на газ та інші види органічного палива. Разом з тим, вже сьогодні достатньо багато замовників були б готові забезпечити собі цілорічний комфорт з кондиціонуванням повітря, якби була в наявності високотехнологічна вітчизняна технічна база теплонасосного машинобудування та сервісного обслуговування [38, 75].

Зростанню споживачів теплових насосів сприяло б створення добре проробленої методики техніко-економічних розрахунків ефективності застосування теплових насосів з урахуванням використання конкретних місцевих джерел низькотемпературної природної енергії. Очевидно, що реальною основою для поширення досвіду застосування теплових насосів та методів їх розрахунків, в тому числі техніко-економічного, міг би стати досвід проектування, будівництва та експлуатації будівель з теплонасосним опаленням [75, 76, 79, 91, 92].

Дослідження ефективності теплонасосних установок розпочалося з праць проф. В. А. Міхельсона [93, 94], який першим розробив (в 1920 р.) питання реалізації ідеї У. Томсона про застосування парокompресійних холодильних машин для опалення.

Згідно з оцінкою В. А. Міхельсона, при наявності відповідного джерела низькотемпературної теплоти тепловий насос може забезпечити зниження витрати палива більш, ніж у 2 рази, у порівнянні з безпосереднім його спалюванням для опалення.

Англійський інженер Холдейн, як і В. А. Міхельсон, надавав перевагу воді як джерелу низькотемпературної теплоти. Він довів, що висока енергетична ефективність досягається при низьких температурах теплоносія в системі опалення. Малі температури нагріваної води забезпечують можливість одержання максимальних коефіцієнтів перетворення.

Г. Ф. Ундріц [95] проводив техніко-економічне зіставлення трьох опалювальних систем – теплонасосної, електричної та звичайної (від водогрійних котлів) – для трьох географічних пунктів – Ленінграда, Одеси, Баку. Згідно з цим, зона ефективного використання ТНУ розширюється зі зменшенням середньої температури опалювального періоду та зі збільшенням його тривалості.

А. М. Регирер [96] в результаті аналізу термодинамічних циклів та схем ТНУ запропонував схему з охолодженням конденсату робочого тіла. Це досягається включенням між конденсатором та дроселем теплообмінника, через який пропускається нагрівана вода, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність ТНУ. В роботі показана ефективність застосування ТНУ для гарячого водопостачання в літній період, коли низькотемпературні джерела мають більш високу температуру, ніж в зимовий період.

А. Н. Ложкін та Ю. В. Голевінський [97, 98], згідно з результатами досліджень парокompресійних та пароструминних теплових насосів, вперше підкреслили економічні та інші додаткові, крім економії палива, переваги застосування ТНУ для централізованого теплопостачання промислових підприємств: зменшення забруднення атмосфери, зниження перевезень палива, ліквідація паливних складів на підприємствах, зменшення потреби у робочій силі та ін.

А. А. Канаєв [99] вказав такі доцільні джерела низькотемпературної теплоти для ТНУ: циркуляційну воду теплових електростанцій, скидні води промислових та комунальних підприємств; підкреслив можливість вирівнювання добового графіка навантаження енергосистем за допомогою ТНУ.

В дослідженні А. М. Каплана [100] зазначені такі актуальні положення:

1) для застосування ТНУ в системах централізованого теплопостачання більш сприятлива відкрита система гарячого водопостачання, оскільки зворотна вода (з підживленням) має більш низьку температуру, ніж в закритій системі;

2) як пікові джерела теплопостачання слід застосовувати водогрійні котли;

3) число годин використання встановленої потужності ТНУ залежить від температури нагріву води в конденсаторах ТНУ;

4) зниження вказаної температури дозволяє істотно зменшити встановлену потужність ТНУ і підвищити енергетичну ефективність, що незначно впливає на річне вироблення теплоти і робить установку більш економічною.

В роботі В. А. Зисіна [101] проведене порівняння термодинамічних циклів ТНУ і ТЕЦ. Доведено, що для досягнення однакових витрат палива при теплопостачанні від ТНУ та від ТЕЦ при невеликому віддаленні споживача від ТЕЦ температура мережевої води повинна становити 35–40 °С, що призводить до зростання капітальних витрат на систему опалення. При віддаленні споживача від ТЕЦ гранична температура мережевої води зростає, і ТНУ наближається за енергетичною ефективністю до ТЕЦ.

В цій роботі В. А. Зисін запропонував нову схему ТНУ, замінивши електричний привод компресора газомоторним. У схемі В. А. Зисіна мережева вода нагрівається послідовно в конденсаторі теплового насоса, теплообмінниках охолодження газового двигуна внутрішнього згорання та теплообміннику-утилізаторі теплоти відхідних газів. В результаті до води підводиться майже в 2 рази більше теплоти, ніж при звичайних методах опалення.

У ескізно-технічному проекті ТНУ з газомоторним приводом для системи гарячого водопостачання одержані високі показники ефективності: економія газу у порівнянні з котельною склала 72 %, термін окупності капіталовкладень – 1,3 роки [102]. Рекомендовано широке впровадження ТНУ з газомоторним приводом в системах гарячого водопостачання споживачів, що мають скидну теплоту. Зазначено, що за

допомогою таких установок витрата газу може бути знижена у 2–4 рази.

Термодинамічне пояснення економії палива при використанні теплових насосів замість котлів наведено у роботах Д. П. Гохштейна [103], В. С. Мартиновського [104–106], Л. М. Розенфельда [107]. При безпосередньому використанні палива для опалення зниження потенціалу теплоти, або її ексергії, що відбувається внаслідок теплообміну при великій різниці температур (між температурою горіння палива та температурою повітря у приміщенні), нічим не компенсується, оскільки при цьому не здійснюється робота. У випадку з тепловим насосом ексергії палива, за винятком неминучих втрат, використовується для підвищення ексергії низькотемпературної теплоти, без чого остання не могла би бути передана приміщенню.

В роботі [108] Г. Лорентцен навів зручний спосіб графічного зображення зон економічної ефективності різних джерел теплопостачання. Графік Г. Лорентцена заснований на тих же принципах, що і графік Г. Ф. Ундріца. Тому можна вважати метод Г. Лорентцена розвитком методу Г. Ф. Ундріца. Межі зон економічної ефективності джерел теплопостачання визначаються за допомогою цих методів в залежності від кліматичних умов району та співвідношення вартостей електроенергії та палива.

Г. Лорентцен у [108] показав вплив вартості палива, коефіцієнта перетворення, капіталовкладень в ТНУ та в системи електропостачання на розподіл меж економічної ефективності джерел теплопостачання.

Багаторічні роботи в Грузії під керівництвом академіка В. І. Гомеллаурі [35, 109–112] присвячені створенню ТНУ на базі серійних холодильних машин для технологічного теплохолодопостачання чайних фабрик.

Слід підкреслити, що за кордоном в останній час реалізується ідея В. А. Зісіна про застосування двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) для привода ТНУ [101].

Розроблена у Німеччині система теплопостачання великих об'єктів за допомогою теплових насосів з приводом від ДВЗ [113, с. 74–78] має схему нагріву мережевої води (в конденсаторі теплового насоса, кожусі двигуна та утилізаторі теплоти продуктів згорання), ідентичну запропонованій В. А. Зісіним.

В роботі [114] наведено таке порівняння: ТНУ на фреоні-12 з електроприводом забезпечує нагрів води до 70 °С, а ТНУ з приводом від ДВЗ та додатковим нагрівом відхідними газами дозволяє одержати 90 °С.

З короткого огляду випливає:

- 1) є багато цінних рекомендацій зі створення теплонасосних джерел централізованого теплопостачання;
- 2) методичні матеріали з оцінки ефективності таких джерел хоча і не можуть бути застосовані безпосередньо, але є базою для подальших розробок.

Тому вибір параметрів та режимів роботи теплонасосної станції (ТНС), щоб забезпечувала такі ж параметри мережевої води, як при теплопостачанні від ТЕЦ та районної котельні, потребує розробки методики оптимізації. Критерієм термодинамічної досконалості ТНУ є ексергетичний ККД [115–117]. Важливе значення ексергетичного аналізу при розробці енергозберігаючих технологій відзначене у [118] та роботах інших провідних енергетиків та економістів.

Ексергетичний аналіз термодинамічних циклів та технічних систем, в тому числі теплонасосних, дозволяє, по-перше, встановити їх максимальні термодинамічні можливості та, по-друге, обґрунтувати рекомендації з їх вдосконалення [105, 106, 119–129].

Найбільш докладно методичні питання ексергетичного аналізу теплонасосних установок розроблені в [58, 115, 116]. Однак, для аналізу великих ТНС цих матеріалів недостатньо: теплові насоси розглядаються поза зв'язком з енергозберігаючими системами та піковими джерелами теплопостачання; немає методики порівняння ТНУ різних видів між собою та з іншими джерелами теплопостачання за ексергетичним ККД. Усе це потребує розробки відповідної методики порівняння.

В наявній літературі містяться досить суперечливі дані щодо ефективності застосування ТНУ в системах теплопостачання. Значення ексергетичного ККД в [3, 5, 92, 109, 130–133] відрізняються між собою майже на 50 %. Це зумовлено, насамперед, різними значеннями прийнятої температури навколишнього середовища і різними значеннями середньотермодинамічної температури підведення теплоти у випарнику ТНУ. Вплив цих температур на ексергетичний ККД ТНУ по суті справи досі невизначений.

Розбіжність в оцінках ефективності застосування ТНУ пов'язана також з тим, що робочими тілами в дослідженнях були різні холодоагенти (R12, R22, R114, R142 та ін.). Більшість з них є озonoактивними. Згідно з протоколом Монреальської міжнародної конференції такі холодоагенти підлягають заміні як екологічно небезпечні [134–138]. Отже, питання щодо робочих тіл для ТНУ залишається також невизначеним.

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

Згідно з ієрархічною структурою великих систем енергетики [139–141] 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 [140–152], 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;



*Наукове видання*

**Ткаченко Станіслав Йосипович  
Остапенко Ольга Павлівна**

**ПАРОКОМПРЕСІЙНІ ТЕПЛОАСОСНІ  
УСТАНОВКИ В СИСТЕМАХ  
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку 21.07. 2009 р.  
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,12  
Наклад 100 прим. Зам. № 2009-141

Вінницький національний технічний університет,  
видавництво «УНІВЕРСУМ – Вінниця»  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/488>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>