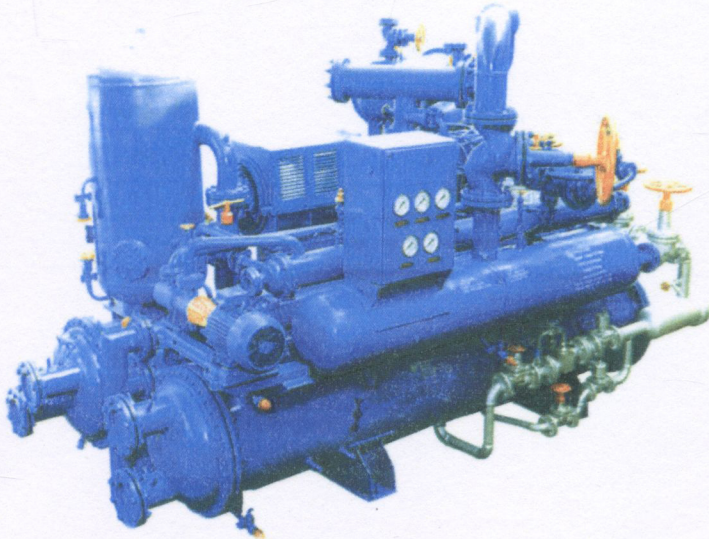


О. П. Остапенко

**ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА
ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ
ТЕПЛОВІ НАСОСИ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. П. Остапенко

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ. ТЕПЛОВІ НАСОСИ

Конспект лекцій

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.57(075)

ББК 31.392я73

О-76

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 25.12.2014 р.)

Рецензенти:

С. М. Василенко, доктор технічних наук, професор

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

Остапенко, О. П.

О-76 Холодильна техніка та холодильна технологія. Теплові насоси : конспект лекцій / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 62 с.

В посібнику наведено конспект лекцій з теоретичних основ енергоперетворень в теплових насосах, класифікації теплових насосів, схем теплонасосних установок; подано термодинамічні основи ексергетичного аналізу парокompресійних теплонасосних установок та станцій. Навчальний посібник передбачає завдання для самостійної роботи студентів: контрольні запитання та тестові завдання для самоперевірки знань студентів за основними темами. Навчальний посібник може бути використаний для дистанційного навчання та самостійної роботи студентів.

УДК 621.57(075)

ББК 31.392я73

ЗМІСТ

Передмова	4
Перелік скорочень і абревіатур	5
1 ЛЕКЦІЯ 1. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ. ЗАМКНЕНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН І ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК	7
2 ЛЕКЦІЯ 2. КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	9
2.1 Класифікація теплових насосів	9
2.2 Сорбційні теплові насоси	10
2.3 Парокомпресійні теплові насоси	11
2.4 Холодоагенти для парокомпресійних теплових насосів	14
3 ЛЕКЦІЯ 3. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	17
3.1 Цикл парокомпресійного теплового насоса	17
3.2 Цикл парокомпресійного теплового насоса з регенерацією теплоти	20
3.3 Ексергетичний аналіз парокомпресійної теплонасосної установки.....	22
4 ЛЕКЦІЯ 4. ТЕПЛОНАСОСНА СТАНЦІЯ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА. ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ТНС	29
4.1 Теплонасосні станції у теплопостачанні	29
4.2 Теплонасосна станція з електричним приводом компресора	29
4.3 Ексергетичні та енергетичні показники роботи теплонасосної станції для системи теплопостачання	31
5 ЛЕКЦІЯ 5. КОГЕНЕРАЦІЙНІ ТЕПЛОНАСОСНІ СТАНЦІЇ. ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ТНС	38
5.1 Використання теплонасосних установок з приводом компресора від газопоршневого двигуна в системах теплопостачання	38
5.2 Теплонасосна станція з приводом від газотурбінної установки	41
6 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ	49
Література	59
Словник найбільш вживаних термінів	60

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник призначений для підготовки спеціалістів теплоенергетичного профілю денної та заочної форм навчання за напрямом "Теплоенергетика".

Однією з головних задач напряму підготовки 6.050601 – "Теплоенергетика" є задача раціонального використання енергоресурсів в теплотехнологічних та теплоенергетичних установках, забезпечення високоефективних режимів роботи систем тепло- і холодопостачання. Це потребує застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни "Холодильна техніка та холодильна технологія", для вирішення конкретних інженерних задач в галузі теплотехнології, тепло- та холодопостачання за допомогою методів термодинамічного та ексергетичного аналізу.

В посібнику наведено конспект лекцій з теоретичних основ енергоперетворень в теплових насосах, класифікації теплових насосів, схем теплонасосних установок; подано термодинамічні основи ексергетичного аналізу парокомпресійних теплонасосних установок та станцій; показано застосування ексергетичного аналізу для дослідження ефективності теплонасосних установок і станцій. Студенту необхідно розуміти фізичну суть термодинамічних процесів в теплових насосах, володіти методами розрахунків процесів і циклів з використанням термодинамічної діаграми і таблиць стану, систематично працювати з рекомендованою літературою.

Навчальний посібник передбачає контрольні запитання та тестові завдання для самоперевірки знань студентів за основними темами.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даного посібника до друку.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І АБРЕВІАТУР

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;
GWP	–	потенціал глобального потепління;
ODP	–	потенціал озонного руйнування;
TEWI	–	загальний еквівалентний вплив потепління;
b	–	питома витрата палива, кг/ГДж; кг/(кВт·год);
e	–	питома ексергія, МДж/м ³ ; 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 ³ /с;
C	–	питома теплоємність, кДж/(кг·°С);
E	–	ексергетична потужність, МВт;
G	–	масова витрата, кг/с;
H	–	теплоперепад, кДж/кг;
N	–	електрична потужність, МВт;
P	–	тиск, МПа;
Q	–	теплова потужність, МВт;
Q _н ^p	–	нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м ³ ;
Q _{ну} ^p	–	нижча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;
T	–	температура, К;
T _{ср} ^в	–	середньотермодинамічна температура теплоносія у випарнику, К;
T _{ср} ^к	–	середньотермодинамічна температура теплоносія в конденсаторі, К;
β	–	частка теплової потужності ТНУ у складі ТНС;
ε	–	холодильний коефіцієнт;
η	–	коефіцієнт корисної дії (ККД);
η _к ^н	–	ККД-нетто котельні;
η _с ^в	–	фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику;

- η_c^k – фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі;
 Θ – величина недогріву, °С;
 λ, π – міра підвищення тиску в компресорі;
 ρ – густина, кг/м³;
 ϕ – коефіцієнт перетворення (опалювальний коефіцієнт).

Індекси:

а – адіабатний; в – випаровування; 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 мережна вода; к – конденсація; кз – камера згорання; км – компресор; кор – корисна; кот – котельня; мв – мережна вода; нс – навколишнє середовище; нт – низькотемпературне джерело теплоти; о – оборотний; оі – відносний внутрішній; ох – система охолодження; п, пал – паливо; пв – повітря; під – підведена; пмв – пряма мережна 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.

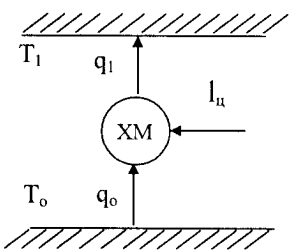
1 ЛЕКЦІЯ 1. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ. ЗАМКНЕНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН І ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

Тепловий насос призначений для вироблення теплоти на основі зворотного термодинамічного циклу. Зворотні цикли зміни стану робочого тіла при зображенні на термодинамічних діаграмах мають напрямок проти годинникової стрілки. Замкнені або кругові процеси характерні для теплових машин, де робоче тіло здійснює певний цикл, повертаючись в початковий стан.

Для здійснення зворотного термодинамічного циклу (перенесення теплоти від менш нагрітих тіл до більш нагрітих), необхідно витратити роботу із зовнішнього середовища, згідно з другим законом термодинаміки. Цикли, в яких теплота передається від менш нагрітих до більш нагрітих тіл, називаються **холодильними** (*refrigeratory*).

За холодильними циклами працюють **термотрансформатори** (*thermo-transformers*), до яких належать **теплові насоси (ТН)** (*heat pumps*), **холодильні машини (ХМ)** (*refrigeratory machines*) та **теплохолодильні установки** (*heat refrigeratory installations*). Ці установки відбирають низькотемпературну теплоту від різних речовин та середовищ і підвищують температурний рівень цієї теплоти при підведенні додаткової енергії (роботи).

Холодильні машини (рис. 1.1) працюють за зворотними циклами, в яких підведення теплоти до робочого тіла (холодоагенту) здійснюється при температурах, нижчих за температуру навколишнього середовища: $T_0 < T_{nc}$. Для того, щоб передати теплоту з нижчого температурного рівня T_0 на вищий T_1 , необхідно затратити зовнішню роботу $l_{ц}$. ХМ сприймає роботу



$l_{ц}$ і віддає більш нагрітому середовищу з температурою T_1 теплоту $q_1 = q_0 + l_{ц}$.

Оскільки теплота q_0 підводиться до робочого тіла, то вона вважається додатною і називається **питомою холодопродуктивністю** (*specific cold productivity*). Питома теплота q_1 , що передається від робочого тіла на більш високий температурний рівень T_1 , називається **питомою теплопродуктивністю** (*specific heating productivity*).

Рисунок 1.1 – Схема ХМ

Якщо приймачем теплоти є навколишнє середовище ($T_1 = T_{nc}$), то установка називається **холодильною машиною**.

Ефективність ХМ оцінюють **холодильним коефіцієнтом** (*refrigeratory coefficient*) – відношенням холодопродуктивності до роботи циклу:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{ц}} = \frac{q_0}{(q_1 - q_0)}$$

Якщо установка передає теплоту середовищу, температура якого вища за температуру навколишнього середовища ($T_1 > T_{нс}$), то таку установку називають **тепловим насосом (ТН)** (*heat pump*). Під **питомою теплопродуктивністю ТН** розуміють питому теплоту q_1 , яка передається до споживача на більш високий температурний рівень T_1 . Ефективність роботи ТН оцінюють **опалювальним коефіцієнтом** (*heating coefficient*) або **коефіцієнтом перетворення** (*coefficient of transformation*): $\varphi = \frac{q_1}{l_{ц}} =$
 $= \frac{q_1}{(q_1 - q_0)} = \varepsilon + 1$.

В теплових насосах до робочого тіла підводиться **низькотемпературна теплота** на нижньому температурному рівні циклу T_0 , яка перетворюється у **високотемпературну теплоту** на верхньому температурному рівні T_1 за умови підведення необхідної роботи циклу $l_{ц}$. Високотемпературна теплота від ТН відводиться до споживачів. Від ХМ теплові насоси відрізняються призначенням (для нагрівання об'єкта, а не охолодження), а також межами робочих температур.

Контрольні запитання

1. Які цикли називаються холодильними?
2. Які установки називаються холодильними машинами?
3. Які установки називаються тепловими насосами?
4. Що розуміють під питомою холодопродуктивністю?
5. Що розуміють під питомою теплопродуктивністю?
6. Що називають холодильним коефіцієнтом та як він визначається?
7. Що називають опалювальним коефіцієнтом та як він визначається?
8. Теплові насоси та холодильні машини. Загальні ознаки та відмінності.

2 ЛЕКЦІЯ 2. КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

2.1 Класифікація теплових насосів

Теплові насоси можна класифікувати за такими ознаками:

а) за принципом дії ТН поділяють на компресійні, струминні; сорбційні та термоелектричні.

В **компресійних** (*compression*) ТН підвищення температурного рівня низькотемпературної теплоти відбувається при механічному стиску холодоагенту в компресорі (поршковому, ротаційному або турбокомпресорі).

Компресійні установки, залежно від робочого тіла, поділяються на **парокомпресійні** (*steam compression*) та **газокомпресійні** (*gas compression*). Робочим тілом в парокомпресійних установках є **холодоагенти** (*refrigerants*). Це речовини, температура кипіння яких нижча за 0 °С при атмосферному тиску (аміак, фреони). В газокомпресійних установках робочим тілом є газ (повітря).

В **струминних** (*inkjet*) теплових насосах замість механічного компресора використовуються струминні компресори. В холодильній техніці використовують пароструминні (ежекційні) ХМ та ТН, де робочим тілом є водяна пара.

В **сорбційних** (*sorption*) ТН замість механічної приводної енергії підводиться зовнішня теплота, а стиск холодоагенту відбувається за допомогою розчинника. В таких ТН використовується **термічний компресор** (*thermal compressor*), який складається з кип'ятильника (генератора), абсорбера, насоса та регульовального вентиля. Залежно від типу термохімічних реакцій розрізняють **абсорбційні** (*absorption*) та **адсорбційні** (*adsorption*) ТН. В **абсорбційних установках** процес сорбції здійснюється в усьому об'ємі абсорбенту (на межі рідкої та парової фаз). В **адсорбційних установках** процес сорбції відбувається на поверхні адсорбенту, який перебуває в твердій фазі (лід).

В **термоелектричних** (*thermoelectric*) ТН використовується ефект Пельтьє: в місцях спайки двох різних електричних провідників при проходженні постійного струму виникає термопара та, залежно від напрямку струму, відбувається нагрівання чи охолодження.

Найбільш поширені парокомпресійні ТН. Широко використовуються ТН абсорбційного типу, в яких відсутній компресор. Перевагою абсорбційних ТН є використання теплової енергії. Це може бути безпосереднє спалювання палива, а також різні скидні потоки теплоти (гаряча вода, відпрацьована пара та ін.). Основний недолік абсорбційних машин – більш низький коефіцієнт перетворення (коефіцієнт трансформації) порівняно з парокомпресійними ТН;

б) за **схемою застосування** теплові насоси можуть бути моновалентні (тільки ТН) та бівалентні (ТН у сполученні з додатковим джерелом теплоти);

в) за джерелами низькотемпературної теплоти (ДНТ) (*low temperature heat sources*): 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.);

г) за сполученням низькотемпературних та високотемпературних джерел теплоти: повітря – повітря; повітря – вода; ґрунт – повітря; ґрунт – вода; вода – повітря; вода – вода;

д) за джерелом приводної енергії: розрізняють ТН, що використовують для роботи електроенергію, паливо того чи іншого виду, вторинні енергетичні ресурси.

2.2 Сорбційні теплові насоси

В сорбційних ТН підвищення температурного рівня теплоти здійснюється з використанням термохімічних реакцій (сорбції). Робоче тіло поглинається сорбентом (*sorbent*) (поглиначем) при низьких температурах. Виділення робочого агента із суміші (десорбція) здійснюється при підведенні додаткової теплоти на високому температурному рівні.

В абсорбційних ТН використовуються бінарні розчини (*binary solutions*), що складаються з абсорбенту (*absorbent*) (бромистий літій, вода, нітрат літію та ін.) і робочого тіла (*working body*) (вода, аміак, дихлорметан та ін.), з різними температурами кипіння, що змінюють температуру при сумішоутворенні.

Принципова схема абсорбційного ТН показана на рис. 2.1.

Робоче тіло у стані рідини при низькому тиску надходить у випарник 1, де за рахунок підведення низькотемпературної теплоти Q_n випаровується (кипить). Пара надходить в абсорбер 2 і поглинається абсорбентом, при цьому виділяється теплота $Q_{аб}$ (оскільки збільшується температура суміші), яка відводиться мережною водою. Утворена суміш робочого тіла і абсорбенту (слабкий розчин) за допомогою насоса 4 перекачується в генератор 6, підігріваючись в регенеративному теплообміннику 5 зустрічним потоком міцного розчину абсорбенту. В генераторі 6 відбувається випаровування з розчину робочого тіла за рахунок підведення додаткової теплоти Q_r на високому температурному рівні t_r . Міцний розчин абсорбенту з генератора повертається через теплообмінник і дроселювальний пристрій 3 в абсорбер, а робоче тіло у стані пари з температурою t_k надходить в конденсатор 7, де передає теплоту Q_k мережній воді і конденсується. Після цього рідке робоче тіло дроселюється в пристрої 3 до тиску у випарнику і цикл повторюється.

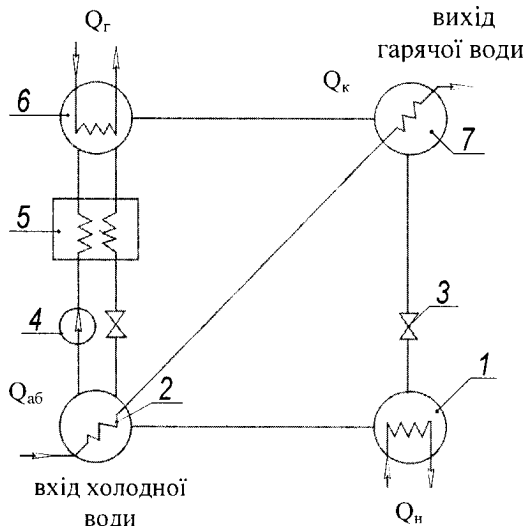


Рисунок 2.1 – Принципова схема абсорбційного ТН: 1 – випарник; 2 – абсорбер; 3 – дросель; 4 – насос; 5 – теплообмінник; 6 – генератор; 7 – конденсатор

Коефіцієнт перетворення абсорбційних ТНУ становить

$$\varphi = \frac{(Q_{аб} + Q_k)}{Q_g} > 1, \quad (2.1)$$

оскільки $Q_{аб} + Q_k = Q_g + Q_n$.

Основною перевагою абсорбційних ТНУ є відсутність рухомих частин і витрат механічної енергії (тільки незначні на насос). Проте для його роботи потрібне джерело високотемпературної теплоти: при $t_k = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ температура теплоти, що підводиться, повинна становити приблизно $t_g = 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3 Парокомпресійні теплові насоси

Розглянемо перетворення енергії в парокомпресійному ТН. Схема парокомпресійного теплового насоса показана на рис. 2.2.

Принцип дії парокомпресійного ТН полягає в здійсненні зворотного термодинамічного циклу легкокиплячою речовиною (холодоагентом). У **випарнику** (*evaporator*) ТН теплота від низькотемпературного джерела поглинається холодоагентом, який випаровується. Пара холодоагенту стискається в **компресорі** (**КМ**) (*compressor*), завдяки чому її температура підвищується. Високотемпературна теплота від стиснутого (гарячого) хо-

лодоагенту відводиться з **конденсатора** (*condenser*) до споживача, а сконденсована пара холодоагенту, після зниження тиску в **дросельному вентилі** (ДВ) (*throttle valve*), знову надходить у випарник.

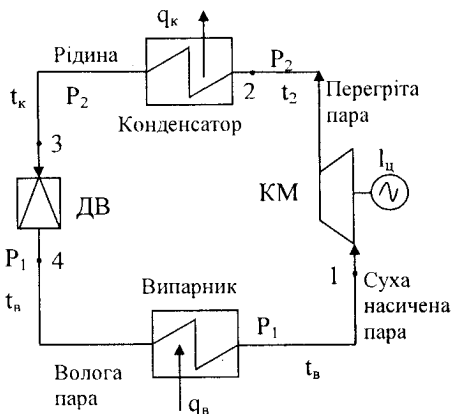


Рисунок 2.2 – Схема парокompресійного ТН

Компресор всмоктує з випарника суху насичену пару холодоагенту при тиску випаровування P_1 і адиабатно її стискає до тиску конденсації P_2 . Перегріта пара з параметрами P_2 і t_2 ізобарно охолоджується і повністю конденсується в конденсаторі при температурі $t_k > t_{нс}$. При конденсації пари холодоагенту в конденсаторі вивільняється високотемпературна теплота q_k , яка відводиться з конденсатора до споживача. Конденсат пари дроселюється за допомогою дросельного вентилі до тиску P_1 . Волога пара, що утворилась при дроселюванні, надходить у випарник теплового насоса, де, при підведенні теплоти q_v , стає сухою насиченою і знову всмоктується компресором.

Розрахунки парокompресійних ТН виконують за допомогою таблиць стану холодоагентів або їх $\lg P-h$ діаграм. Зображення циклу парокompресійного ТН наведено на рис. 2.3.

Процес 4–1 – ізобарне підведення теплоти до робочого тіла у випарнику. Процес 1–2а – адиабатний стиск пари холодоагенту в компресорі (теоретичний процес). Процес 1–2 – політропний стиск пари холодоагенту в компресорі (дійсний процес). Процес 2а–3 – ізобарне відведення теплоти в конденсаторі від холодоагенту до споживача (теоретичний процес). Процес 2–3 – ізобарне відведення теплоти в конденсаторі від холодоагенту до споживача (дійсний процес). Процес 3–4 – розширення робочого тіла (зниження тиску) в дросельному вентилі.

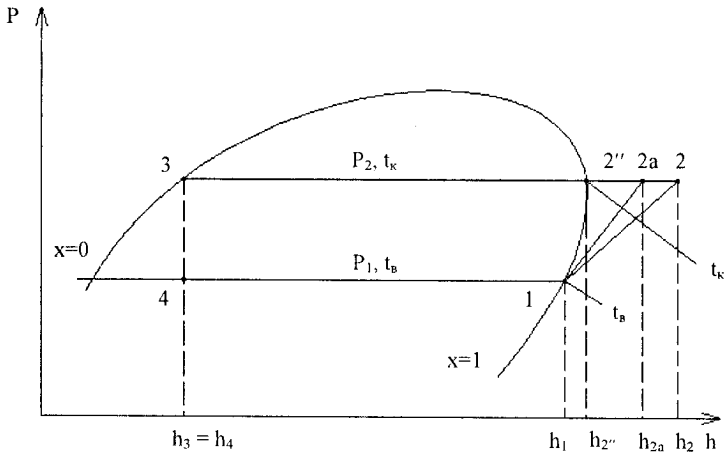


Рисунок 2.3 – Зображення циклу парокомпресійного ТН на $\lg P-h$ діаграмі
 Питома теоретична робота компресора (процес 1–2а)

$$l_{\text{кмо}} = h_{2a} - h_1. \quad (2.2)$$

Питома теплота, підведена у випарник

$$q_0 = q_B = h_1 - h_3 = h_1 - h_4. \quad (2.3)$$

Питома теплота, що відводиться до споживача з конденсатора ТН в теоретичному циклі

$$q_1 = q_K = h_{2a} - h_3 = q_0 + l_{\text{кмо}} = q_B + l_{\text{кмо}}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт перетворення теоретичного циклу ТН

$$\varphi_0 = \frac{q_0}{l_{\text{ц}}} = \frac{q_1}{l_{\text{кмо}}}. \quad (2.5)$$

Теплова потужність випарника

$$Q_B = G_{\text{ха}} \cdot q_B, \quad (2.6)$$

де $G_{\text{ха}}$ – масова витрата холодоагенту, кг/с.

Теплова потужність, відведена з конденсатора ТН

$$Q_K = G_{xa} \cdot q_K. \quad (2.7)$$

Теоретична потужність компресора ТН

$$N_{кмо} = G_{xa} \cdot l_{кмо}. \quad (2.8)$$

Масова витрата холодоагенту в ТН

$$G_{xa} = \frac{Q_B}{q_B} = \frac{Q_K}{q_K} = \frac{N_{кмо}}{l_{кмо}}. \quad (2.9)$$

Коефіцієнт перетворення ідеального циклу ТН (циклу Карно) (*Carnot cycle*)

$$\varphi_T = \frac{T_K}{T_K - T_B}, \quad (2.10)$$

де T_K і T_B – абсолютні термодинамічні температури конденсації та випаровування холодоагенту, відповідно.

При необоротному адіабатному стиску (процес 1–2) питома робота компресора збільшується порівняно з теоретичним процесом та становить $l_{км} = h_2 - h_1 = \frac{(h_{2a} - h_1)}{\eta_{oi}^{км}} = \frac{l_{кмо}}{\eta_{oi}^{км}}$, де $\eta_{oi}^{км}$ – відносний внутрішній ККД компресора теплового насоса. Ентальпія пари холодоагенту на виході з компресора для дійсного процесу стиску $h_2 = h_1 + l_{км}$. В цьому випадку значення коефіцієнта перетворення зменшується та визначається як $\varphi = \frac{q_K}{l_{ц}} = \frac{q_K}{l_{км}} = \varphi_0 \cdot \eta_{oi}^{км}$. Питома теплота, що відводиться до споживача з конденсатора теплового насоса, в дійсному циклі збільшується порівняно з теоретичним та становить $q_1 = q_K = h_2 - h_3 = q_B + l_{км}$. Дійсна потужність компресора ТН $N_{км} = G_{xa} \cdot l_{км}$.

2.4 Холодоагенти для парокompресійних теплових насосів

Оскільки ТН працюють в вищому температурному діапазоні ніж ХМ, то в ТН використовуються холодоагенти для вироблення теплоти в діапазоні температур від 50 до 110 °С. В такому випадку непотрібні кардинальні конструктивні зміни в сучасних холодильних компресорах та машинах.

Робочі речовини для ТН повинні відповідати таким загальним вимогам:

- 1) бути хімічно стабільними та інертними до основних конструкційних матеріалів та мастил;
- 2) мати допустимі значення робочих тисків, різниці і відношення тисків нагнітання і всмоктування;
- 3) не чинити негативної дії на навколишнє середовище і людину;
- 4) бути негорючими та вибухобезпечними;
- 5) мати високий ступінь термодинамічної досконалості та велику об'ємну теплопродуктивність;
- 6) мати сприятливе сполучення теплофізичних властивостей, що впливають на масу і габарити теплообмінників;
- 7) повинні випускатись промисловістю та мати відносно низьку вартість.

Робочі речовини (як і ТН) можна поділити на 2 групи:

- 1) середньотемпературні (з нормальною температурою кипіння нижче мінус 10 °С);
- 2) високотемпературні (з нормальною температурою кипіння вище мінус 10 °С).

Як холодоагенти для ТН використовуються синтетичні холодоагенти – фреони та їх суміші, що руйнують озоновий шар атмосфери, та природні холодоагенти, а також їх суміші.

Фреони: R134a; R152a; R32; R125; R124; R 143a; R 142b.

Суміші фреонів: R 407C; R 410A; RC318.

Природні холодоагенти: аміак R717, вуглеводні (пропан R290, бутан R600, ізобутан R600a, пропілен; суміші пропану, бутану, ізобутану, етану), двоокис вуглецю R744.

Основні вимоги до холодоагентів, що можуть використовуватись в теплових насосах, поділяються на такі **групи**:

– **екологічні та токсикологічні** – низький потенціал глобального потепління GWP (*Global Warming Potential*), низьке значення загального еквівалентного впливу потепління TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), низьке значення або відсутність потенціалу озонного руйнування ODP (*Ozone Depletion Potential*), низькі показники токсичності: гранично допустима концентрація (ГДК) та інші;

– **теплофізичні** – невисокі значення тиску конденсації, велика прихована теплота пароутворення, низьке значення поверхневого натягу, в'язкості та питомого об'єму пари при тисках всмоктування холодоагенту в компресор, високі значення показників теплопровідності рідкої та парової фаз холодоагенту;

– **експлуатаційні** – термохімічна стабільність та хімічна сумісність з матеріалами та компресорними мастилами, достатня взаємна розчинність з мастилом, пожежобезпечність, здатність розчиняти воду, незначна текучість, наявність запаху та інші;

– **економічні** – наявність товарного виробництва та низька вартість холодоагентів і компресорних мастил, можливість дозаправлення холодильного обладнання та регенерації холодоагенту.

В табл. 2.1 наведені основні властивості чистих холодоагентів, які використовуються в теплових насосах останнього покоління, або є перспективними до використання в ТН у найближчому майбутньому.

Таблиця 2.1 – Основні властивості холодоагентів для ТН

Холодоагент	Хімічна формула	Критичні параметри		ODP	GWP	ГДК, ppm
		температура $t_K, ^\circ\text{C}$	тиск $P_K, \text{МПа}$			
R744	CO_2	31,06	7,364	0	1	5000
R290	C_3H_8	96,7	4,248	0	< 1	1000
R717	NH_3	132,3	11,33	0	< 1	25
R134a	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$	101,1	4,059	0	1300	1000
R152a	$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	113,3	4,517	0	150	1000
R600	n- C_4H_{10}	152	3,796	0	3	800
R600a	i- C_4H_{10}	134,9	3,640	0	3	1000
R142b	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2\text{Cl}$	137,1	4,123	0,065	2000	1000
RC318	C_6F_8	115,2	2,778	0	9100	1000
R124	$\text{C}_2\text{HF}_4\text{Cl}$	122,3	3,624	0,10	480	500

де ГДК – гранично допустима концентрація холодоагенту в робочій зоні, ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-4} \% \text{ об'єму}$ за Європейським стандартом pr EN 388-1).

Контрольні запитання

1. Класифікація теплових насосів за принципом дії.
2. Класифікація ТН за схемою застосування, джерелами теплоти та приводної енергії, сполученням джерел теплоти.
3. Класифікація сорбційних теплових насосів.
4. Абсорбційні теплові насоси. Принцип дії.
5. Як визначається коефіцієнт перетворення абсорбційного ТН? Переваги та недоліки абсорбційних ТН.
6. Парокомпресійні теплові насоси. Принцип дії.
7. Холодоагенти для парокомпресійних теплових насосів.
8. Основні вимоги до холодоагентів для ТН.
9. Коефіцієнт перетворення циклу парокомпресійного ТН. Коефіцієнт перетворення ідеального циклу ТН (циклу Карно).

3 ЛЕКЦІЯ 3. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

3.1 Цикл парокомпресійного теплового насоса

Схема парокомпресійної теплонасосної установки (ТНУ) показана на рис. 3.1, а зображення циклу на T-s і P-h діаграмах на рис. 3.2 і 3.3, відповідно.

У випарник ТНУ надходить теплота від низькотемпературного джерела з температурою $t'_в$. У випарнику теплота відбирається від низькотемпературного теплоносія та витрачається на випаровування холодоагенту. Температура низькотемпературного теплоносія на виході з випарника після охолодження становить $t''_в$. В конденсатор ТНУ надходить високотемпературне джерело теплоти з температурою $t'_к$. Внаслідок конденсації холодоагенту, в конденсаторі відбувається нагрівання високотемпературного теплоносія. Після підігрівання в конденсаторі температура високотемпературного джерела підвищується та становить $t''_к$ на виході з конденсатора.

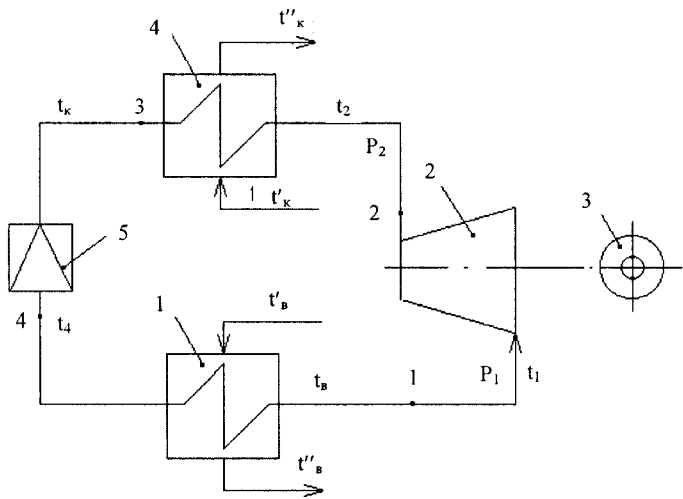


Рисунок 3.1 – Схема парокомпресійної ТНУ: 1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – дросель

Питома робота компресора, кДж/кг

$$l_{\text{KM}} = h_2 - h_1 = \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}}} = \frac{l_{\text{KM0}}}{\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}}}. \quad (3.1)$$

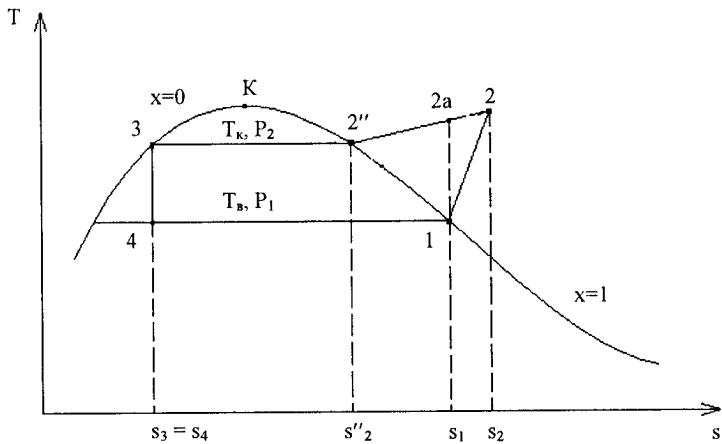


Рисунок 3.2 – Цикл парокompресійної ТНУ на T-s діаграмі

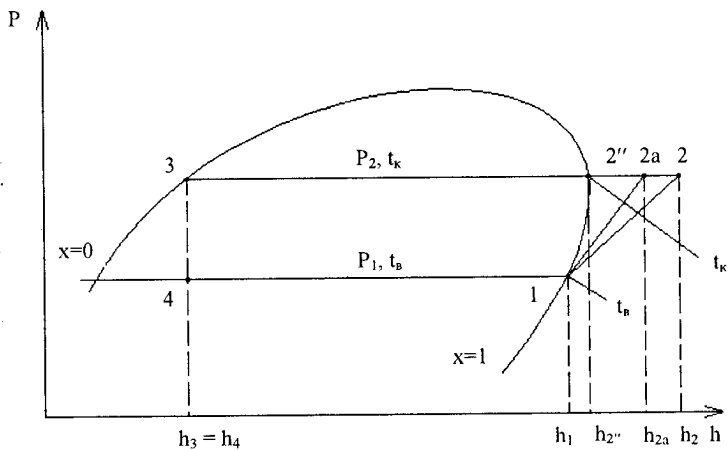


Рисунок 3.3 – Цикл парокompресійної ТНУ на lg P-h діаграмі

Питома підведена робота електродвигуна, кДж/кг

$$l_{ед} = l_{під} = \frac{l_{км}}{\eta_{ем}} = \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_{oi}^{км} \cdot \eta_{ем}}, \quad (3.2)$$

де $\eta_{ем}$ – електромеханічний ККД електродвигуна.

Питома теплота, яка відводиться з конденсатора, кДж/кг

$$q_k = h_2 - h_3 = h_2 - (h_2'' - r), \quad (3.3)$$

де r – питома теплота пароутворення робочої рідини, кДж/кг.

Питома теплота, яка підводиться із зовнішнього середовища у випарник, кДж/кг

$$q_v = h_1 - h_4. \quad (3.4)$$

Рівняння енергетичного балансу ТНУ, кДж/кг

$$l_{км} + q_v = q_k = q_{тну}$$

або

$$l_{кмо} / \eta_{oi}^{км} + q_v = q_k = q_{тну}, \quad (3.5)$$

де $l_{кмо} = h_{2a} - h_1$ – питома робота компресора в оборотному циклі, кДж/кг.

Енергетична ефективність ТНУ оцінюється за допомогою коефіцієнта перетворення:

$$\varphi = q_{тну} / l_{ед} = (l_{км} + q_v) / l_{ед} = \left[\frac{l_{км}}{l_{км} / \eta_{ем}} \right] + \varepsilon = \eta_{ем} + \varepsilon, \quad (3.6)$$

де $\varepsilon = q_v / l_{ед}$ – холодильний коефіцієнт.

Остання формула відображає той факт, що втрати енергії в приводі компресора розсіюються в зовнішньому середовищі та не входять в теплову продуктивність ТНУ, оскільки: $q_{тну} = \frac{q_v}{\left(1 - \eta_{ем} / \varphi\right)}$.

Величина коефіцієнта перетворення парокомпресійної ТНУ залежить від: температур високотемпературного (ВДТ) та низькотемпературного джерела теплоти (НДТ), термодинамічних властивостей робочого тіла, особливостей термодинамічного циклу ТН, технічної досконалості конструкції теплового насоса.

Орієнтовні числові значення коефіцієнта перетворення ТНУ залежно від різниці температур ВДТ та НДТ наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта перетворення залежно від різниці температур ВДТ та НДТ

Різниця температур $t_{\text{ВДТ}} - t_{\text{НДТ}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт перетворення
80	2,2
60	3,0
40	4,5

Коефіцієнт перетворення ϕ є показником питомого вироблення теплоти на одиницю витраченої роботи, але він не дозволяє визначити термодинамічні втрати і тому не може бути критерієм термодинамічної досконалості ТНУ. Міра якості ТНУ має оцінюватись величиною

$$\eta_e = \frac{\phi}{\phi_o}, \quad (3.7)$$

де η_e – ексергетичний ККД,

ϕ_o – коефіцієнт перетворення оборотної ТНУ.

3.2 Цикл парокомпресійного теплового насоса з регенерацією теплоти

Для підвищення ефективності циклу ТНУ здійснюється внутрішній регенеративний теплообмін між потоком рідкого робочого тіла перед дросельним вентиляем та потоком пари перед компресором. В результаті теплообміну рідке робоче тіло додатково охолоджується, а суха насичена пара холодоагенту перегрівается. Однак із застосуванням регенеративного теплообміну збільшується робота стиску в компресорі. Тому ефективність циклу підвищується лише при використанні певних робочих тіл, зокрема фреонів.

Принципова схема парокомпресійної ТНУ з регенерацією теплоти показана на рис. 3.4.

Регенерація теплоти в циклі ТНУ забезпечується встановленням проміжного перегрівника пари холодоагенту (охолодника конденсату) перед компресором. З випарника суха насичена пара холодоагенту надходить у перегрівник пари, де вона перегрівается, відбираючи теплоту від гарячого рідкого холодоагенту після конденсатора. Перегріта пара з проміжного перегрівника надходить в компресор. Це унеможливує конденсацію пари холодоагенту при стиску в компресорі, завдяки чому підвищується ефективність роботи компресора та теплонасосної установки.

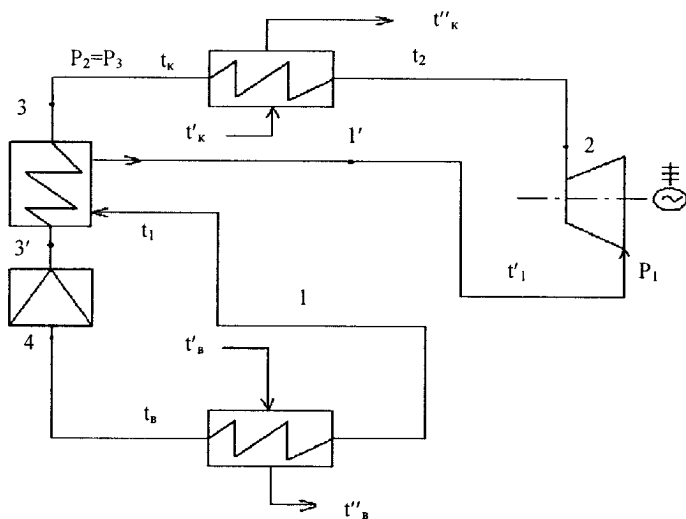


Рисунок 3.4 – Принципова схема парокompресійної ТНУ з регенерацією теплоти

Зображення циклу парокompресійної ТНУ з регенерацією теплоти на P-h діаграмі показано на рис. 3.5.

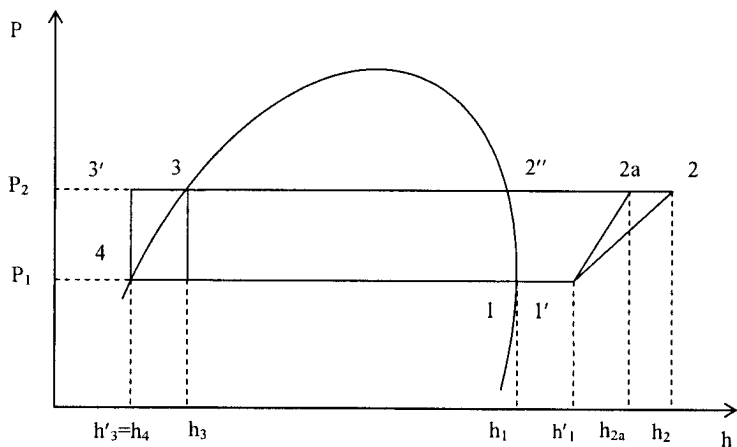


Рисунок 3.5 – Побудова циклу парокompресійної ТНУ з регенерацією теплоти на lg P-h діаграмі

Процес 4–1 – ізобарне підведення теплоти до робочого тіла у випарнику. Процес 1–1' – перегрів сухої насиченої пари холодоагенту в перегрівнику пари. Процес 1–2а – адіабатний стиск пари холодоагенту в компресорі (теоретичний процес). Процес 1–2 – політропний стиск пари холодоагенту в компресорі (дійсний процес). Процес 2а–3 – ізобарне відведення теплоти в конденсаторі від холодоагенту до споживача (теоретичний процес). Процес 2–3 – ізобарне відведення теплоти в конденсаторі від холодоагенту до споживача (дійсний процес). Процес 3–3' – ізобарне охолодження конденсату в охолоднику конденсату (перегрівнику пари) перед дросельним вентиляем. Процес 3–4 – розширення робочого тіла (зниження тиску) в дросельному вентилі.

Температура перегрітої пари холодоагенту на виході з перегрівника пари (охолодника конденсату)

$$t'_1 = t_b + \theta_n, \quad (3.8)$$

де θ_n – величина перегріву пари холодоагенту, °С.

Питома теплота, яку сприймає пара холодоагенту в охолоднику, кДж/кг

$$q_{п0} = h'_1 - h_1. \quad (3.9)$$

Ентальпія рідкого холодоагенту на виході охолодника (ентальпія конденсату), кДж/кг

$$h'_3 = h_3 - q_{п0}. \quad (3.10)$$

Ентальпія холодоагенту після дросельного вентиля $h_4 = h'_3$.

Питома теплота, підведена у випарник $q_b = h_1 - h_4$.

Адіабатний теплоперепад в компресорі $H_a = l_{кмо} = h_{2a} - h'_1$.

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі (дійсна робота компресора) $H_p = l_{км} = H_a / \eta_{0i}^{км}$.

Дійсна ентальпія холодоагенту за компресором $h_2 = h'_1 + H_p$.

Питома теплота, відведена з конденсатора $q_k = h_2 - h_3$.

3.3 Ексергетичний аналіз пароконденсійної теплонасосної установки

Тепловий насос сприймає тепловий потік при низькій температурі (на холодильній стороні), а також необхідну для привода енергію та використовує обидва цих потоки енергії при підвищеній (порівняно з холодною стороною) температурі у вигляді теплового потоку.

Ексергія (*exergy*) термодинамічної системи визначається кількістю роботи, яку можна отримати від системи при її оборотному приведенні у рівновагу з навколишнім середовищем.

В загальному випадку ексергія теплоти визначається за формулою:

$$e_q = q \cdot \left(1 - \frac{T_{nc}}{T}\right) = q \cdot \eta_c, \quad (3.11)$$

де T_{nc} і T – абсолютна температура навколишнього середовища і середня термодинамічна температура підведення або відведення теплоти; η_c – ексергетична температурна функція (фактор Карно).

При сталій температурі $T > T_{nc}$ тепловий потік q , його ексергія e_q та **анергія** a_q пов'язані співвідношеннями:

– тепловий потік

$$q = e_q + a_q, \quad (3.12)$$

– ексергія

$$e_q = q \cdot \left(1 - \frac{T_{nc}}{T}\right) = q \cdot \eta_c, \quad (3.13)$$

– анергія

$$a_q = q \cdot \frac{T_{nc}}{T} = q \cdot (1 - \eta_c). \quad (3.14)$$

Схема парокompресійної ТНУ показана на рис. 3.6, а зображення циклу на P-h та T-s діаграмах на рис. 3.7 та 3.8, відповідно.

Позначимо температури низькотемпературного теплоносія: на вході у випарник $t'_{в}$, на виході з випарника $t''_{в}$. Позначимо температури високотемпературного теплоносія: на вході в конденсатор $t'_{к}$, на виході з конденсатора $t''_{к}$.

Із конденсатора ТНУ теплота відводиться при сталій температурі T_k , яка має бути більшою за температуру джерела високотемпературної теплоти на величину недогріву θ . У випарник теплота підводиться при сталій температурі T_b , яка має бути меншою від температури низькотемпературного джерела на величину недогріву θ .

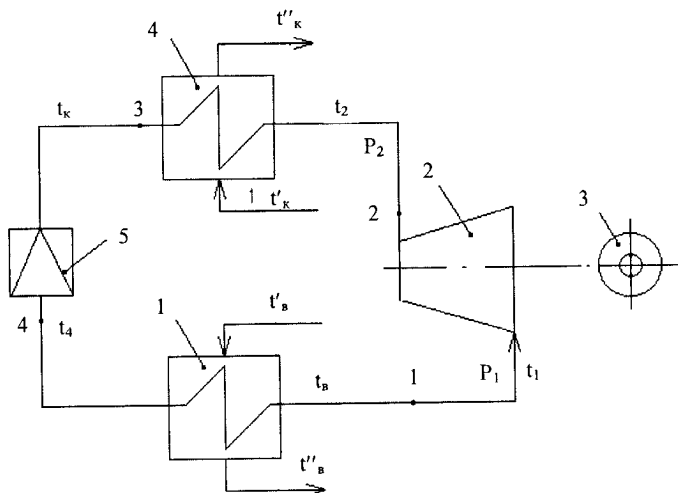


Рисунок 3.6 – Схема парокompресійної ТНУ: 1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – дросель

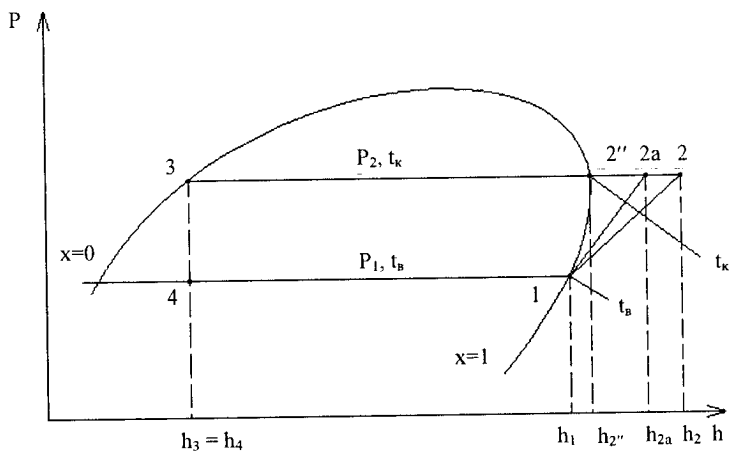


Рисунок 3.7 – Цикл парокompресійної ТНУ на lg P-h діаграмі

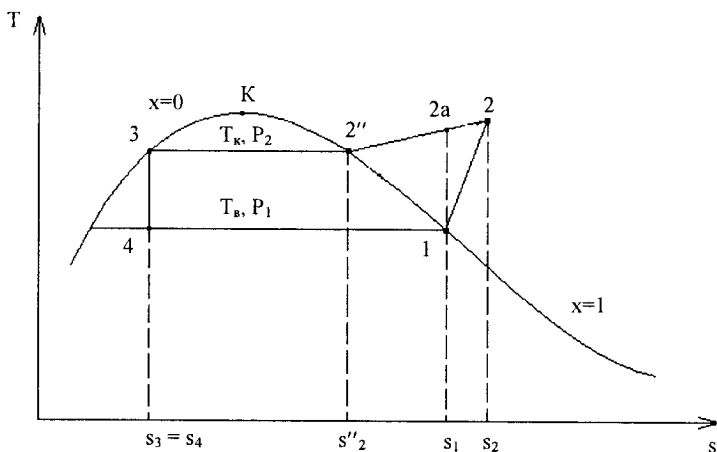


Рисунок 3.8 – Цикл парокompресійної ТНУ на T-s діаграмі

Критерієм термодинамічної досконалості ТНУ є **ексергетичний ККД** (*exergetic efficiency*)

$$\eta_e = \frac{e_{\text{від}}}{e_{\text{під}}} = \frac{e_{\text{qк}}}{e_{\text{qв}} + l_{\text{ед}}} = \frac{q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{к}}}{l_{\text{ед}} + q_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{в}}}, \quad (3.15)$$

де $e_{\text{під}}$, $e_{\text{від}}$ – ексергія підведеної до випарника і компресора та відведеної з конденсатора енергії, відповідно;

$e_{\text{qв}}$, $e_{\text{qк}}$ – ексергія теплоти у випарнику та конденсаторі, відповідно;

$\eta_{\text{с}}^{\text{в}} = 1 - \frac{T_{\text{нс}}}{T_{\text{ср}}^{\text{в}}}$ – ексергетична температурна функція (фактор Карно)

для підведеної до випарника теплоти;

$\eta_{\text{с}}^{\text{к}} = 1 - \frac{T_{\text{нс}}}{T_{\text{ср}}^{\text{к}}}$ – фактор Карно для відведеної з конденсатора теплоти;

$T_{\text{ср}}^{\text{в}}$ і $T_{\text{ср}}^{\text{к}}$ – середньотермодинамічні температури підведення (у випарник) і відведення (з конденсатора) теплоти, відповідно;

$T_{\text{нс}}$ – абсолютна температура навколишнього середовища.

Ексергетичний баланс ТНУ

$$e_{\text{під}} = e_{\text{від}} + \sum \Delta e_{\text{вт}} \quad (3.16)$$

або

$$l_{ед} + e_{qв} = e_{qк} + \Sigma \Delta e_{вт}, \quad (3.17)$$

де $\Sigma \Delta e_{вт}$ – втрати ексергії.

Загальні втрати ексергії в теплонасосній установці поділяються на **внутрішні** і **зовнішні**. До **внутрішніх** належать втрати ексергії в компресорі і дроселі, де процеси здійснюються без теплообміну із зовнішнім середовищем і характеризуються збільшенням ентропії робочого тіла.

Втрати ексергії в компресорі

$$\Delta e_{вт}^{км} = T_{нс} \cdot (s_2 - s_1), \quad (3.18)$$

де s_1 і s_2 – ентропія холодоагенту на вході та виході з компресора, кДж/(кг·К).

Втрати ексергії в дроселі

$$\Delta e_{вт}^{дп} = T_{нс} \cdot (s_4 - s_3), \quad (3.19)$$

де s_3 і s_4 – ентропія холодоагенту на вході та виході з дроселя, кДж/(кг·К).

Зовнішні витрати ексергії пов'язані з процесами теплообміну у конденсаторі та випарнику. Вони визначаються як різниця початкових та кінцевих значень ексергії за винятком ексергії, що відводиться в конденсаторі, або за додаванням ексергії, що підводиться у випарнику.

Вони визначаються так:

– втрати ексергії у випарнику

$$\begin{aligned} \Delta e_{вт}^в &= (e_4 - e_1) + e_{qв} = [h_4 - h_1 - T_{нс} \cdot (s_4 - s_1)] + q_в \cdot \eta_c^в = \\ &= -q_в + q_в \cdot \eta_c^в + T_{нс} \cdot (s_1 - s_4) = -q_в \cdot (1 - \eta_c^в) + T_{нс} \cdot (s_1 - s_4), \end{aligned} \quad (3.20)$$

– втрати ексергії у конденсаторі

$$\begin{aligned} \Delta e_{вт}^к &= (e_2 - e_3) - e_{qк} = [h_2 - h_3 - T_{нс} \cdot (s_2 - s_3)] - q_к \cdot \eta_c^к = \\ &= q_к - q_к \cdot \eta_c^к - T_{нс} \cdot (s_2 - s_3) = q_к \cdot (1 - \eta_c^к) - T_{нс} \cdot (s_2 - s_3). \end{aligned} \quad (3.21)$$

Ексергетичний ККД ТНУ дорівнюватиме

$$\eta_e = \frac{e_{\text{від}}}{e_{\text{під}}} = \frac{e_{\text{qк}}}{e_{\text{під}}} = \frac{e_{\text{qк}}}{e_{\text{qк}} + \Sigma \Delta e_{\text{вТ}}}. \quad (3.22)$$

Підведення теплоти у випарнику здійснюється при середньотермодинамічній температурі джерела низькотемпературної теплоти

$$T_{\text{в}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{в}}' - T_{\text{в}}''}{\ln \frac{T_{\text{в}}'}{T_{\text{в}}''}}. \quad (3.23)$$

Відведення теплоти у конденсаторі здійснюється при середньотермодинамічній температурі джерела високотемпературної теплоти, яка визначається

$$T_{\text{к}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{к}}'' - T_{\text{к}}'}{\ln \frac{T_{\text{к}}''}{T_{\text{к}}'}}. \quad (3.24)$$

Відповідно до цього значення ексергетичної температурної функції у випарнику та конденсаторі становлять

$$\eta_{\text{с}}^{\text{к}} = 1 - T_{\text{нс}} / T_{\text{к}}^{\text{ср}}, \quad (3.25)$$

$$\eta_{\text{с}}^{\text{в}} = 1 - T_{\text{нс}} / T_{\text{в}}^{\text{ср}} \quad \text{при } T_{\text{нс}} < T_{\text{в}}^{\text{ср}}, \quad (3.26)$$

$$\eta_{\text{с}}^{\text{в}} = T_{\text{нс}} / T_{\text{в}}^{\text{ср}} - 1 \quad \text{при } T_{\text{нс}} > T_{\text{в}}^{\text{ср}}. \quad (3.27)$$

Загальний вираз ексергетичного ККД

$$\begin{aligned} \eta_{\text{с}} &= \frac{q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{к}}}{I_{\text{ед}} + q_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{в}}} = \frac{q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{к}}}{I_{\text{ед}} + q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{ем}}}{\varphi}\right)} = \\ &= \frac{q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{к}}}{I_{\text{ед}} \cdot \left[1 + \varphi \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{ем}}}{\varphi}\right)\right]}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Формула (3.28) є загальним виразом для визначення ексергетичного ККД ТНУ. В окремих випадках формула (3.28) спрощується.

Так, у випадку $T_B^{cp} = T_{nc}$, $\eta_c^B = 0$, тоді замість (3.28) одержимо:

$$\eta_e = \varphi \cdot \eta_c^K. \quad (3.29)$$

Контрольні запитання

1. Коефіцієнт перетворення як міра енергетичної ефективності теплового насоса. Ідеальний та реальний коефіцієнт перетворення.
2. Рівняння енергетичного балансу ТНУ.
3. Зображення циклу парокомпресійної ТНУ на P-h діаграмі.
4. Зображення циклу парокомпресійної ТНУ на T-s діаграмі.
5. Питомі енергетичні показники роботи ТНУ.
6. Внутрішні та зовнішні втрати ексергії в ТНУ.
7. Рівняння ексергетичного балансу ТНУ.
8. Як визначаються внутрішні втрати ексергії в ТНУ?
9. Визначення факторів Карно у випарнику та конденсаторі.
10. Як визначаються зовнішні втрати ексергії в ТНУ?
11. Коефіцієнт перетворення та ексергетичний ККД як показники ефективності роботи ТНУ. Охарактеризувати.
12. Як визначається ексергетичний ККД ТНУ?

4 ЛЕКЦІЯ 4. ТЕПЛОНАСОСНА СТАНЦІЯ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА. ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ТНС

4.1 Теплонасосні станції у тепlopостачанні

У наш час технологія тепlopостачання з використанням теплових насосів застосовується практично в усіх розвинених країнах світу. Усі 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 становитиме 75%. Для України використання парокомпресійних ТНУ в системах опалення може забезпечити сумарні теплові навантаження близько 4900 МВт.

Одним з найбільш ефективних засобів з утилізації теплоти низькотемпературних вторинних енергоресурсів є **теплонасосні станції (ТНС)** (*heat pump stations*), які широко застосовуються та добре себе зарекомендували у Швеції та інших західних країнах.

4.2 Теплонасосна станція з електричним приводом компресора

Для країн з централізованим тепlopостачанням, як свідчить досвід Швеції, найбільший ефект можна отримати за рахунок створення теплонасосних станцій на базі теплонасосних установок і водогрійних котлів (ВК).

Теплонасосна станція є комплексним енергетичним підприємством, призначеним для централізованого тепlopостачання. В ТНС перетворення енергії здійснюється в двох установках: ТНУ і водогрійних котлах. В ТНУ, що під'єднана перед ВК, підводиться не первинна енергія палива, а перетворена енергія в формі механічної роботи.

На рис. 4.1 показана принципова схема ТНС, яка складається з парокомпресійної ТНУ та водогрійного котла, який підключений послідовно з конденсатором ТНУ. Теплонасосна станція забезпечує нагрів заданої витрати мережної води в системі теплофікації від температури зворотної мережної води $T_{з\text{МВ}}$ до температури прямої мережної води $T_{п\text{МВ}}$.

Оскільки енергетична ефективність роботи ТНУ і ВК відрізняється, то розподіл підігріву мережної води між ними буде суттєво впливати на загальну ефективність роботи ТНС. Для кожного заданого температурного режиму роботи системи тепlopостачання ($T_{п\text{МВ}}/T_{з\text{МВ}}$) повинен існувати певний оптимальний розподіл підігріву між ТНУ ($T_{\text{ТН}} - T_{з\text{МВ}}$) та ВК ($T_{п\text{МВ}} - T_{\text{ТН}}$).

Оптимальні температури підігріву мережної води у теплових насосах при роботі в системі тепlopостачання становлять $t_{\text{ТН}} = 70 - 80$ °С та залежать від температурного графіка, за яким працює ТНС.

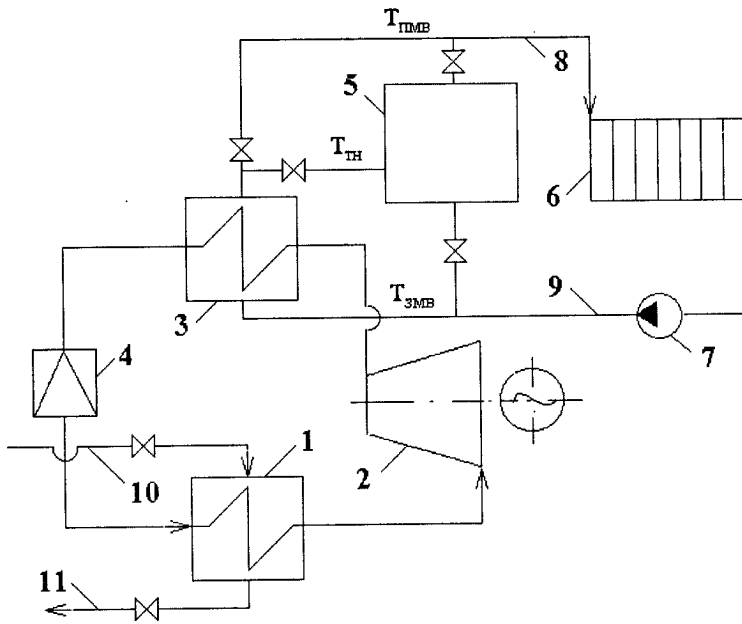


Рисунок 4.1 – Схема теплонасосної станції: 1 – випарник ТНУ; 2 – компресор з електроприводом; 3 – конденсатор ТНУ; 4 – дросельний вентиль; 5 – водогрійний котел; 6 – теплові споживачі; 7 – мережний насос; 8 і 9 – лінії прямої та зворотної мережної води; 10 і 11 – лінії низькотемпературного джерела енергії; $T_{ТН}$ – температура підігрітої води в ТНУ; $T_{ТНВ}$ і $T_{ЗМВ}$ – температура прямої та зворотної мережної води в системі тепlopостачання

Отже, відпуск води в систему гарячого водопостачання (за нормами $65\text{ }^{\circ}\text{C}$) у міжопалювальний сезон може здійснюватись безпосередньо від ТНУ. Для забезпечення потреб опалення в опалювальний період здійснюється відповідне догрівання теплоносія в водогрійному котлі від $t_{ТН} = 70 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до необхідної температури за температурним графіком.

Джерелами низькотемпературної теплоти для ТНУ можуть бути теплові викиди промислових підприємств з температурою $20 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3 Ексергетичні та енергетичні показники роботи теплонасосної станції для системи тепlopостачання

Теплова потужність ТНС становить $Q_{\text{ТНС}}$. У складі ТНС працюють водогрійний котел та ТНУ. Температура навколишнього середовища $T_{\text{НС}}$. Температура води на вході у випарник теплового насоса становить t'_B , на виході t''_B . Температура прямої та зворотної мережної води у системі тепlopостачання $t_{\text{ПМВ}}$ та $t_{\text{ЗМВ}}$, відповідно. Витрата мережної води $G_{\text{МВ}}$. Температура мережної води після конденсатора теплового насоса $t_{\text{ТН}}$. Теплова потужність випарника теплового насоса Q_B . Теплова потужність водогрійного котла в складі ТНС $Q_{\text{ВК}}$.

Ексергетичні показники роботи ТНС потрібно порівнювати з показниками роботи водогрійної котельні такої ж потужності $Q_{\text{КОТ}} = Q_{\text{ТНС}}$.

Температура мережної води після конденсатора ТНУ, °С

$$t_{\text{ТН}} = t_k - \theta, \quad (4.1)$$

де t_k – температура конденсації холодоагенту, °С;

θ – величина недогріву, °С.

Витрата мережної води, що циркулює в системі тепlopостачання, кг/с

$$G_{\text{МВ}} = \frac{Q_{\text{ТС}} \cdot 10^3}{C_{\text{РВ}} \cdot (t_{\text{ПМВ}} - t_{\text{ЗМВ}})}, \quad (4.2)$$

де $Q_{\text{ТС}}$ – потужність теплових споживачів, МВт;

$C_{\text{РВ}}$ – питома теплоємність води, кДж/(кг · °С);

$t_{\text{ПМВ}}$ – температура прямої мережної води, °С;

$t_{\text{ЗМВ}}$ – температура зворотної мережної води, °С.

Теплова потужність ТНУ, МВт

$$Q_{\text{ТНУ}} = Q_k = G_{\text{МВ}} \cdot C_{\text{РВ}} \cdot (t_{\text{ТН}} - t_{\text{ЗМВ}}) \cdot 10^{-3}. \quad (4.3)$$

Температура холодоагенту у випарнику, °С

$$t_B = t'_B - \theta, \quad (4.4)$$

де t_b'' – температура низькотемпературного теплоносія на виході з випарника ТНУ, °С;

θ – величина недогріву, °С.

Питома теплота, підведена до випарника, кДж/кг

$$q_b = h_1 - h_4, \quad (4.5)$$

де h_1, h_4 – ентальпії холодоагенту в точках 1 та 4, відповідно (див. рис. 3.3), кДж/кг.

Адіабатний теплоперепад в компресорі, кДж/кг

$$H_a = l_{кмо} = h_{2a} - h_1, \quad (4.6)$$

де h_{2a} – ентальпія холодоагенту в точці 2а (див. рис. 3.3), кДж/кг.

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі, кДж/кг

$$H_p = l_{км} = \frac{H_a}{\eta_{oi}^{км}}, \quad (4.7)$$

де $\eta_{oi}^{км}$ – відносний внутрішній ККД компресора.

Ентальпія холодоагенту в точці 2 (див. рис. 3.3), кДж/кг

$$h_2 = h_1 + H_p. \quad (4.8)$$

Питома теплота, відведена з конденсатора, кДж/кг

$$q_k = h_2 - h_3, \quad (4.9)$$

де h_3 – ентальпія холодоагенту в точці 3 (див. рис. 3.3), кДж/кг.

Масова витрата холодоагенту, що циркулює в ТНУ, кг/с

$$G_{ха} = \frac{Q_{тну} \cdot 10^3}{q_k \cdot \eta_{то}}, \quad (4.10)$$

де $\eta_{то}$ – ККД теплообмінника (конденсатора).

Потужність, яка витрачається на компресор, МВт

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_{\text{р}}}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3}, \quad (4.11)$$

де $\eta_{\text{ем}}$ – електромеханічний ККД компресора.

Теплова потужність випарника, МВт

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{ха}} \cdot q_{\text{в}} \cdot 10^{-3}. \quad (4.12)$$

Коефіцієнт перетворення ТНУ

$$\varphi = \frac{Q_{\text{тну}}}{N_{\text{км}}}. \quad (4.13)$$

Витрата умовного палива на компресор ТНУ, кг/с

$$B_{\text{у}}^{\text{тну}} = \frac{N_{\text{км}}}{(Q_{\text{ну}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})}, \quad (4.14)$$

де $Q_{\text{ну}}^{\text{р}}$ – нижча робоча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;

$\eta_{\text{ес}}$, $\eta_{\text{ем}}$ – ККД електростанцій і електромереж, відповідно.

Середня температура мережної води в конденсаторі ТНУ, °С

$$t_{\text{тн}}^{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{тн}} + t_{\text{зmv}})}{2}. \quad (4.15)$$

Абсолютна середня температура мережної води в конденсаторі ТНУ (середньотермодинамічна температура відведення теплоти), К

$$T_{\text{к}}^{\text{ср}} = 273 + t_{\text{тн}}^{\text{ср}}. \quad (4.16)$$

Фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі

$$\eta_{\text{с}}^{\text{к}} = 1 - \frac{T_{\text{нс}}}{T_{\text{к}}^{\text{ср}}}, \quad (4.17)$$

де $T_{\text{нс}}$ – абсолютна температура навколишнього середовища, К.

Абсолютна середня температура низькотемпературного теплоносія у випарнику ТНУ (середньотермодинамічна температура підведення теплоти), К

$$T_B^{cp} = 273 + \frac{(t'_B + t''_B)}{2}, \quad (4.18)$$

де t'_B , t''_B – температура низькотемпературного теплоносія на вході та виході з випарника, відповідно, °С.

Фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику

$$\eta_c^B = 1 - \frac{T_{nc}}{T_B^{cp}}. \quad (4.19)$$

Ексергетичний ККД ТНУ

$$\eta_e^{TНУ} = Q_K \cdot \eta_c^K / [Q_B \cdot \eta_c^B + N_{KM}] \quad (4.20)$$

Теплова потужність водогрійного котла, МВт

$$Q_{BK} = Q_{Tc} - Q_{TНУ}. \quad (4.21)$$

Абсолютна середня температура мережної води у котлі, К

$$T_{BK}^{cp} = 273 + \frac{(t_{TH} + t_{ПМВ})}{2}. \quad (4.22)$$

Ексергетична потужність відведеної з котла теплоти, МВт

$$E_{Q_{BK}} = Q_{BK} \left(1 - \frac{T_{nc}}{T_{BK}^{cp}} \right). \quad (4.23)$$

Витрата умовного палива на котел, кг/с

$$B_y^{BK} = \frac{Q_{BK}}{(Q_{Hy}^p \cdot \eta_K^H)}. \quad (4.24)$$

де η_K^H – ККД-нетто котельні.

Ексергетична потужність підведеної у котел теплоти, МВт

$$E_{\text{під}}^{\text{ВК}} = 1,05 \cdot Q_{\text{нУ}}^{\text{р}} \cdot B_{\text{у}}^{\text{ВК}}. \quad (4.25)$$

Ексергетичний ККД котельні у складі ТНС

$$\eta_{\text{е}}^{\text{ВК}} = \frac{E_{\text{QВК}}}{E_{\text{під}}^{\text{ВК}}}. \quad (4.26)$$

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти ТНС, К

$$T_{\text{ТНС}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{(t_{\text{пМВ}} + t_{\text{зМВ}})}{2}. \quad (4.27)$$

Загальна ексергетична потужність теплоти, відпущеної ТНС, МВт

$$E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}} = Q_{\text{тс}} \left(1 - \frac{T_{\text{ТНС}}}{T_{\text{ТНС}}^{\text{ср}}} \right). \quad (4.28)$$

Загальна витрата умовного палива на ТНС, кг/с

$$B_{\text{у}}^{\text{ТНС}} = B_{\text{у}}^{\text{ТНУ}} + B_{\text{у}}^{\text{ВК}}. \quad (4.29)$$

Ексергетична потужність підведеної у ТНС теплоти, МВт

$$E_{\text{під}}^{\text{ТНС}} = 1,05 \cdot B_{\text{у}}^{\text{ТНС}} \cdot Q_{\text{нУ}}^{\text{р}}. \quad (4.30)$$

Ексергетичний ККД ТНС

$$\eta_{\text{е}}^{\text{ТНС}} = \frac{E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}}}{E_{\text{під}}^{\text{ТНС}}}. \quad (4.31)$$

Загальна витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ, кг/с

$$B_{\text{у}}^{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{(Q_{\text{нУ}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}^{\text{н}})}. \quad (4.32)$$

Економія умовного палива за рахунок використання ТНС, кг/с

$$\Delta B_{\text{у}} = B_{\text{у}}^{\text{заг}} - B_{\text{у}}^{\text{ТНС}}. \quad (4.33)$$

Частка теплової потужності ТНС, що покриває ТНУ

$$\beta = Q_{\text{тну}} / Q_{\text{тс}} \quad (4.34)$$

Частка палива, яка витрачається на ТНУ

$$\alpha_{\text{п}} = B_{\text{у}}^{\text{тну}} / B_{\text{у}}^{\text{тнс}} \quad (4.35)$$

Питома витрата умовного палива ТНУ, кг/ГДж

$$b_{\text{у}}^{\text{тну}} = B_{\text{у}}^{\text{тну}} / [Q_{\text{тну}} \cdot 10^{-3}] \quad (4.36)$$

Питома витрата умовного палива котлами у складі ТНС, кг/ГДж

$$b_{\text{у}}^{\text{вк}} = B_{\text{у}}^{\text{вк}} / [Q_{\text{вк}} \cdot 10^{-3}] \quad (4.37)$$

Питома витрата умовного палива ТНС, кг/ГДж

$$b_{\text{у}}^{\text{тнс}} = B_{\text{у}}^{\text{тнс}} / [Q_{\text{тс}} \cdot 10^{-3}] \quad (4.38)$$

Питома витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ, кг/ГДж

$$b_{\text{у}}^{\text{заг}} = B_{\text{у}}^{\text{заг}} / [Q_{\text{тс}} \cdot 10^{-3}] \quad (4.39)$$

Ексергетичний ККД котельні без роботи ТНУ

$$\eta_{\text{е}} = E_{\text{відп}}^{\text{тнс}} / (1,05 \cdot B_{\text{у}}^{\text{заг}} \cdot Q_{\text{н\у}}^{\text{р}}) \quad (4.40)$$

Процентна економія умовного палива за рахунок використання ТНС, %

$$\Delta B_{\text{у}} (\%) = \Delta B_{\text{у}} \cdot 100 / B_{\text{у}}^{\text{заг}} \quad (4.41)$$

Контрольні запитання

1. Що називають теплонасосною станцією?
2. Підігрівання якої води здійснюється в тепловому насосі у складі ТНС?
3. Як визначається навантаження водогрійного котла у складі ТНС?
4. Як визначити витрату умовного палива на компресор ТНУ?
5. Вкажіть діапазон температур оптимального підігріву теплоносія в ТНУ у складі ТНС.
6. Вкажіть температуру підігріву води в водогрійному котлі ТНС.
7. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з електроприводом?
8. Що може бути джерелом низькотемпературної теплоти для ТНС?
9. Як визначається ексергетичний ККД ТНС з електроприводом?

5 ЛЕКЦІЯ 5. КОГЕНЕРАЦІЙНІ ТЕПЛОАСОСНІ СТАНЦІЇ. ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ТНС

5.1 Використання теплонасосних установок з приводом компресора від газопоршневого двигуна в системах теплопостачання

Застосування ТНУ з приводом компресора від газових двигунів може розглядатись як один з важливих напрямів енерго- і ресурсозбереження, оскільки передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна.

Принципова схема ТНС з приводом компресора від газопоршневого двигуна показана на рис. 5.1. Привод компресора ТНУ забезпечується за допомогою газопоршневого двигуна 5, електрогенератора 6, електродвигуна 4 і мультиплікатора 3. Частка зворотної мережної 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 $T_{\text{тн}}$. Далі, залежно від температурного режиму роботи теплової мережі, гаряча вода може додатково підігріватись у водогрійному котлі або безпосередньо надходити до теплових споживачів 13.

Методика розрахунку ТНС на базі ТНУ з приводом компресора від дизельного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) наведена нижче.

Ефективний ККД ДВЗ

$$\eta_e = 0,123 / b_y, \quad (5.1)$$

де b_y – питома витрата умовного палива за паспортними даними ДВЗ, кг/(кВт·год).

Повний ККД ДВЗ і електрогенератора

$$\eta_d = \eta_e \cdot \eta_{em}, \quad (5.2)$$

де η_{em} – електромеханічний ККД електрогенератора.

Питома витрата умовного палива на дизель-генератор, кг/(кВт·год)

$$b_y^d = 0,123 / \eta_d. \quad (5.3)$$

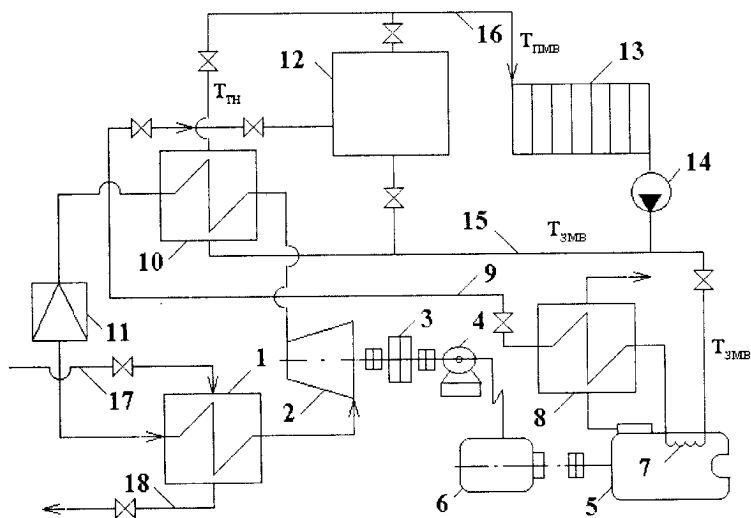


Рисунок 5.1 – Принципова схема ТНС з дизель-генераторним приводом компресора ТНУ і з утилізацією теплоти відхідних газів після дизеля: 1 – випарник ТНУ; 2 – компресор; 3 – мультиплікатор; 4 – електродвигун; 5 – дизельний двигун; 6 – електрогенератор; 7 – теплообмінна поверхня системи охолодження дизеля; 8 – утилізатор відхідних газів після дизельного двигуна; 9 – лінія гарячої мережної води від утилізатора; 10 – конденсатор ТНУ; 11 – дросельний вентиль; 12 – водогрійний котел; 13 – теплові споживачі; 14 – мережний насос системи теплофікації; 15 і 16 – лінія прямої та зворотної мережної води, відповідно; 17 і 18 – лінія підведення і відведення низькотемпературного теплоносія у випарник ТНУ; $T_{пмв}$, $T_{змв}$ – температури прямої та зворотної мережної води в системі тепlopостачання, відповідно; $T_{тн}$ – температура мережної води після підігріву в ТНУ

Теоретична маса повітря для спалювання 1 м^3 палива, $\text{кг}/\text{м}^3$

$$M^{\circ} = V^{\circ} \cdot \rho, \quad (5.4)$$

де V° – теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 м^3 робочого палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Питома витрата суміші (повітря і палива), $\text{кг}/\text{м}^3$

$$M_{\text{см}} = 1 + \alpha \cdot M^{\circ}, \quad (5.5)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря.

Витрата умовного палива на ДВЗ для привода компресора, кг/с

$$B_y^{\text{д}} = b_y^{\text{д}} \cdot N_{\text{км}} / 3,6, \quad (5.6)$$

де $N_{\text{км}}$ – потужність компресора теплового насоса, МВт.

Витрата робочого палива на ДВЗ, м³/с

$$B_p^{\text{д}} = B_y^{\text{д}} \cdot Q_{\text{нр}}^{\text{р}} / Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (5.7)$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м³.

Витрата відхідних газів після ДВЗ, кг/с

$$G_{\text{вг}} = B_p^{\text{д}} \cdot M_{\text{см}}. \quad (5.8)$$

Потужність утилізатора відхідних газів ДВЗ, МВт

$$Q_{\text{ут}} = G_{\text{вг}} \cdot C_{\text{пр}} \cdot (t_{\text{д}} - t_{\text{ут}}'') \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.9)$$

де $C_{\text{пр}}$ – питома теплоємність газів після ДВЗ при середній температурі газів в утилізаторі, кДж/(кг · °С);

$t_{\text{д}}$ – температура вихідних газів після ДВЗ, °С;

$t_{\text{ут}}''$ – температура вихідних газів після утилізатора, °С;

$\eta_{\text{то}}$ – ККД утилізатора.

Потужність системи охолодження ДВЗ, МВт

$$Q_{\text{ох}} = 0,2 \cdot B_p^{\text{д}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{то}}. \quad (5.10)$$

Загальна потужність теплоутилізаційного устаткування ДВЗ, МВт

$$\Sigma Q_{\text{ут}} = Q_{\text{ут}} + Q_{\text{ох}}. \quad (5.11)$$

Загальна теплова потужність ТНУ, МВт

$$Q_{\text{ТНУ}} = Q_{\text{к}} + \Sigma Q_{\text{УТ}}, \quad (5.12)$$

де $Q_{\text{к}}$ – потужність конденсатора теплового насоса, МВт.
Теплова потужність водогрійних котлів у складі ТНС, МВт

$$Q_{\text{ВК}} = Q_{\text{ТС}} - Q_{\text{ТНУ}}. \quad (5.13)$$

Далі методика розрахунку аналогічна методиці розрахунку ТНС з електроприводом компресора ТНУ і відповідає формулам (4.1–4.13), (4.15–4.20), (4.22–4.28) та (4.30–4.41).

Загальна витрата умовного палива на ТНС з приводом від ДВЗ, кг/с

$$V_{\text{уд}}^{\text{ТНС}} = V_{\text{у}}^{\text{д}} + V_{\text{у}}^{\text{ВК}}. \quad (5.14)$$

Економія умовного палива на ТНС з ДВЗ порівняно з ТНС з електроприводом, кг/с

$$\Delta V_{\text{у}}^* = V_{\text{у}}^{\text{ТНС}} - V_{\text{уд}}^{\text{ТНС}}, \quad (5.15)$$

де $V_{\text{у}}^{\text{ТНС}}$ – загальна витрата умовного палива ТНС з електроприводом з формули (4.29), кг/с.

5.2 Теплонасосна станція з приводом від газотурбінної установки

Методика розрахунку ТНС на базі ТНУ з приводом компресора від газотурбінної установки (ГТУ) та утилізацією теплоти відхідних газів в топках водогрійних котлів наведена нижче.

Тиск повітря за компресором, МПа

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda_{\text{КМ}}, \quad (5.16)$$

де P_1 – тиск повітря перед компресором, МПа;
 $\lambda_{\text{КМ}}$ – міра підвищення тиску в компресорі.

Тиск газів перед турбіною, МПа

$$P_3 = P_2 \cdot \varepsilon, \quad (5.17)$$

де ε – коефіцієнт повного стиску.

Міра зменшення тиску в турбіні

$$\lambda_{\tau} = \frac{P_3}{P_4}, \quad (5.18)$$

де P_4 – тиск газів за турбіною, МПа.

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{\left(\lambda_{\text{км}}^{0,286} - 1 \right)}{\eta_{\text{oi}}^{\text{км}}} \right], \quad (5.19)$$

де T_1 – температура повітря перед компресором, К;

$\eta_{\text{oi}}^{\text{км}}$ – ККД компресора.

Температура газів за турбіною, К

$$T_4 = T_3 \cdot \left[1 - \left(1 - \lambda_{\tau}^{-0,286} \right) \cdot \eta_{\text{oi}}^{\tau} \right], \quad (5.20)$$

де T_3 – температура в камері згорання, К;

η_{oi}^{τ} – ККД газової турбіни.

Середня температура газів в турбіні, К

$$\bar{T}_{2\tau} = \frac{T_3 + T_4}{2}, \quad (5.21)$$

де T_4 – температура газів за турбіною, К.

Питома робота газів в турбіні, кДж/кг

$$l_{\tau} = \bar{C}_{\text{рг}} \cdot (T_3 - T_4), \quad (5.22)$$

де $\bar{C}_{\text{рг}}$ – середня теплоємність газів, кДж/(кг·К).

Питома робота стиску в компресорі, кДж/кг

$$l_{\text{км}} = C_{\text{рп}} \cdot (T_2 - T_1), \quad (5.23)$$

де $C_{\text{рп}}$ – середня теплоємність повітря, кДж/(кг·К).

Питома робота циклу ГТУ, кДж/кг

$$l_{\text{ц}} = (l_{\tau} - l_{\text{км}}) \cdot \eta_{\text{ем}}, \quad (5.24)$$

де $\eta_{ем}$ – електромеханічний ККД.

Середня теплоємність суміші, кДж/(кг·К)

$$\bar{C}_p = 0,35 \cdot C_{pr} + 0,65 \cdot C_{pn}, \quad (5.25)$$

де C_{pr} , C_{pn} – теплоємність повітря і газів при t_3 , відповідно, кДж/(кг·К).

Питома теплота, що підведена в камері згорання ГТУ, кДж/кг

$$q_{кз} = \frac{(\bar{C}_p \cdot t_3 - C_{pn} \cdot t_2)}{\eta_{кз}}, \quad (5.26)$$

де $\eta_{кз}$ – ККД камери згорання.

Коефіцієнт корисної дії ГТУ

$$\eta_{ГТУ} = \frac{l_u}{q_{кз}}. \quad (5.27)$$

Питома витрата умовного палива ГТУ, кг/(кВт·год)

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_{ГТУ}}. \quad (5.28)$$

Загальна витрата умовного палива ГТУ, кг/с

$$B_y^{ГТУ} = \frac{b_y \cdot N_e}{3,6}, \quad (5.29)$$

де N_e – потужність електрогенератора ГТУ, яка відповідає потужності компресора ТНУ, МВт.

Витрата робочого палива ГТУ, м³/с

$$B_p^{ГТУ} = B_y^{ГТУ} \cdot \frac{Q_{ny}^p}{Q_H^p}, \quad (5.30)$$

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

Q_H^p – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м³.

Витрата димових газів ГТУ, кг/с

$$G_r = N_e \cdot 10^3 / I_{ц}, \quad (5.31)$$

де $I_{ц}$ – питома робота циклу ГТУ, кДж/кг.

Витрата робочого палива на одиницю витрати димових газів

$$q_p = \frac{q_{кз} \cdot \eta_{кз}}{Q_{ну}^p \cdot \eta_{кз} - C_{рп} \cdot t_2 + C_{пал} \cdot t_{пал}}, \quad (5.32)$$

де $q_{кз}$ – питома теплота, що підведена в камері згорання, кДж/кг;

$C_{пал}$ – теплоємність палива, кДж/(кг · °С);

$t_{пал}$ – температура палива, °С.

Коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha = 1 / (V^0 \cdot \rho_{пв} \cdot q_p), \quad (5.33)$$

де V^0 – теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 м³ палива, м³/м³;

$\rho_{пв}$ – густина повітря, кг/м³.

Витрата продуктів згорання в димових газах, кг/с

$$G_{пз} = G_r / \alpha. \quad (5.34)$$

Витрата повітря, кг/с

$$G_{пв} = G_r - G_{пз}. \quad (5.35)$$

Витрата кисню в димових газах, кг/с

$$G_{0_2} = 0,21 \cdot G_{пв}. \quad (5.36)$$

Процентний вміст кисню в димових газах, %

$$C_{0_2} = G_{0_2} / G_r \cdot 100. \quad (5.37)$$

Потужність камери згорання, МВт

$$Q_{кз} = G_r \cdot q_{кз} \cdot 10^{-3}, \quad (5.38)$$

де $q_{кз}$ – питома теплота, що підведена в камері згорання ГТУ, кДж/кг.
Теплова потужність відпрацьованих в ГТУ газів, МВт

$$Q_{вг} = (1 - \eta_{ГТУ}) \cdot Q_{кз}, \quad (5.39)$$

де $\eta_{ГТУ}$ – ККД ГТУ.

Коефіцієнт використання теплоти відпрацьованих газів в утилізаторі

$$\Psi = \frac{t_4 - t_{вг}}{t_4 - t_1}, \quad (5.40)$$

де $t_{вг}$ – температура відпрацьованих газів на виході з утилізатора, °С;

t_4 – температура газів за турбіною, °С.

Корисна потужність утилізатора, МВт

$$Q_{кор} = \Psi \cdot Q_{вг} \cdot \eta_{то}, \quad (5.41)$$

де $\eta_{то}$ – ККД утилізатора.

Потужність водогрійного котла без скидання продуктів згорання в топку котла, МВт

$$Q'_{вк} = Q_{тс} - Q_{к} - Q_{кор}, \quad (5.42)$$

де $Q_{тс}$ – потужність теплових споживачів, МВт;

$Q_{к}$ – потужність конденсатора ТНУ, МВт.

Потужність, яка вноситься з відхідними газами ГТУ в топку котла, МВт

$$Q_{топ} = Q'_{вк} / 4. \quad (5.43)$$

Потужність відхідних газів, які надходять в утилізатор, МВт

$$Q_{газ} = Q_{вг} - Q_{топ}. \quad (5.44)$$

Потужність утилізатора відхідних газів, МВт

$$Q_{утил} = \Psi \cdot Q_{газ} \cdot \eta_{то}. \quad (5.45)$$

Загальна теплова потужність ТНУ з приводом від ГТУ, МВт

$$Q_{\text{ТНУ}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{утил}} \quad (5.46)$$

де $Q_{\text{к}}$ – потужність конденсатора ТНУ, МВт.

Потужність водогрійного котла за рахунок спалювання органічного палива, МВт

$$Q_{\text{вк}}^{\text{пал}} = Q_{\text{тс}} - Q_{\text{ТНУ}} - Q_{\text{топ}} \quad (5.47)$$

Загальна теплова потужність водогрійного котла, МВт

$$Q_{\text{вк}}^{\text{ГТУ}} = Q_{\text{вк}}^{\text{пал}} + Q_{\text{топ}} \quad (5.48)$$

Витрата умовного палива на водогрійний котел, кг/с

$$B_{\text{уг}}^{\text{вк}} = Q_{\text{вк}}^{\text{пал}} / (Q_{\text{нУ}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}^{\text{н}}) \quad (5.49)$$

де $\eta_{\text{к}}^{\text{н}}$ – ККД-нетто котельні.

Загальна витрата умовного палива ТНС з приводом від ГТУ, кг/с

$$B_{\text{уг}}^{\text{ТНС}} = B_{\text{уг}}^{\text{ГТУ}} + B_{\text{уг}}^{\text{вк}} \quad (5.50)$$

де $B_{\text{уг}}^{\text{ГТУ}}$ – витрата умовного палива на ГТУ з формули (5.29), кг/с.

Загальна потужність теплонасосної станції з приводом від газотурбінної установки, МВт

$$Q = N_{\text{е}} + Q_{\text{тс}} \quad (5.51)$$

де $N_{\text{е}}$ – потужність електрогенератора ГТУ, яка відповідає потужності компресора ТНУ, МВт;

$Q_{\text{тс}}$ – потужність теплових споживачів, МВт.

Частка теплового споживання

$$\beta_{\text{т}} = Q_{\text{тс}} / Q \quad (5.52)$$

Частка теплової потужності ТНС, яку покриває ТНУ

$$\beta = (Q_{\text{ТНУ}} + Q_{\text{топ}}) / Q_{\text{тс}} \quad (5.53)$$

Ексергетична потужність підведеної у ТНС теплоти, МВт

$$E_{\text{під}}^{\text{ТНС}} = 1,05 \cdot B_{\text{уг}}^{\text{ТНС}} \cdot Q_{\text{ну}}^{\text{р}}. \quad (5.54)$$

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти ТНС, К

$$T_{\text{ТНС}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{(t_{\text{пмв}} + t_{\text{зmv}})}{2}. \quad (5.55)$$

Загальна ексергетична потужність відпущеної ТНС теплоти, МВт

$$E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}} = Q_{\text{тс}} \left(1 - \frac{T_{\text{ТНС}}}{T_{\text{ТНС}}^{\text{ср}}} \right). \quad (5.56)$$

Ексергетичний ККД ТНС

$$\eta_{\text{ег}}^{\text{ТНС}} = \frac{E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}}}{E_{\text{під}}^{\text{ТНС}}}. \quad (5.57)$$

Економія умовного палива ТНС з приводом від ГТУ порівняно з ТНС з електроприводом, кг/с

$$\Delta B_{\text{у}}^{**} = B_{\text{у}}^{\text{ТНС}} - B_{\text{уг}}^{\text{ТНС}}, \quad (5.58)$$

де $B_{\text{у}}^{\text{ТНС}}$ – загальна витрата умовного палива ТНС з електроприводом з формули (4.29), кг/с.

Загальна витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ, кг/с

$$B_{\text{у}}^{\text{заг}} = Q_{\text{тс}} \left(Q_{\text{ну}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}^{\text{н}} \right). \quad (5.59)$$

Економія умовного палива за рахунок використання ТНС з приводом від ГТУ, кг/с

$$\Delta B_{\text{у}}^{\text{Г}} = B_{\text{у}}^{\text{заг}} - B_{\text{уг}}^{\text{ТНС}}, \quad (5.60)$$

де $B_{\text{уг}}^{\text{ТНС}}$ – загальна витрата умовного палива ТНС з приводом від ГТУ з формули (5.50), кг/с.

Частка палива, яка витрачається на ТНУ

$$\alpha_{\text{п}}^{\text{г}} = \frac{B_{\text{у}}^{\text{ГТУ}}}{B_{\text{уГ}}^{\text{ТНС}}}, \quad (5.61)$$

де $B_{\text{у}}^{\text{ГТУ}}$ – витрата умовного палива на ГТУ з формули (5.29), кг/с.

Процентна економія умовного палива за рахунок використання ТНС з приводом від ГТУ, %

$$\Delta B_{\text{у}}^{\text{г}} (\%) = \frac{\Delta B_{\text{у}}^{\text{г}} \cdot 100}{B_{\text{у}}^{\text{заг}}}. \quad (5.62)$$

Питома витрата умовного палива на вироблення теплової енергії ТНС, кг/ГДж

$$b_{\text{уГ}}^{\text{ТНС}} = \frac{B_{\text{уГ}}^{\text{ТНС}}}{Q_{\text{тс}} \cdot 10^{-3}}. \quad (5.63)$$

Контрольні запитання

1. Що називають теплонасосною станцією?
2. Підігрівання якої води здійснюється в тепловому насосі у складі ТНС?
3. Як визначається навантаження водогрійного котла у складі ТНС?
4. Як визначається загальна теплова потужність ТНУ з приводом від ДВЗ?
5. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з приводом від газової турбіни?
6. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з приводом від двигуна внутрішнього згорання?
7. Як визначається економія умовного палива на когенераційних ТНС?
8. Що називають когенераційною теплонасосною станцією?
9. Як визначається ексергетичний ККД когенераційних ТНС?

6 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАТЬ

Тест 1. Класифікація теплових насосів

1. Які холодоагенти використовуються в парокомпресійних теплових насосах?

- | | |
|-----------|-----------|
| 1) R134a; | 6) R600a; |
| 2) R142b; | 7) R407C; |
| 3) R11; | 8) R717; |
| 4) R12; | 9) R290. |
| 5) R22; | |

2. Які установки називаються тепловими насосами?

- 1) які переносять теплоту від менш нагрітого тіла до більш нагрітого;
- 2) які переносять теплоту від більш нагрітого тіла до менш нагрітого;
- 3) насоси, що перекачують гарячі рідини;
- 4) насоси, що перекачують теплі рідини.

3. Як теплонасосні установки поділяють за принципом дії?

- 1) струминні;
- 2) сорбційні;
- 3) компресійні;
- 4) термоелектричні;
- 5) з тепловим приводом;
- 6) з електричним приводом;
- 7) з механічним приводом.

4. Які теплонасосні установки називають компресійними?

1) ТН, в яких для стиску холодоагенту використовується механічний компресор;

2) ТН, в яких використовується ефект Пельть'є;

3) ТН, в яких стиск холодоагенту відбувається за допомогою розчинника;

4) ТН, в яких є струминний компресор.

5. Які теплонасосні установки називають сорбційними?

1) з використанням теплоти термохімічних реакцій;

2) зі струминним компресором;

3) де робочим тілом є водяна пара.

6. Які теплонасосні установки називають адсорбційними?

1) де процес сорбції здійснюється в усьому об'ємі адсорбенту;

2) де процес сорбції відбувається на поверхні адсорбенту, який перебуває в твердій фазі;

3) з використанням теплоти термохімічних реакцій.

7. Які теплонасосні установки називають адсорбційними?

1) де процес сорбції відбувається на поверхні адсорбенту, який перебуває в твердій фазі;

2) де процес сорбції здійснюється в усьому об'ємі адсорбенту;

3) з використанням термохімічних реакцій.

8. Які теплонасосні установки називають термоелектричними?

1) з електричним приводом компресора;

2) де є електронагрівник;

3) які працюють за ефектом Пельть'є.

9. Які теплонасосні установки називають струминними?

1) де є потік теплоносія;

2) де відбуваються хімічні реакції;

3) зі струминним компресором;

4) з ефектом термопар.

10. Як теплові насоси поділяють за типом привода?

1) пароконденсійні;

2) газокомпресійні;

3) струминні;

4) термоелектричні;

5) з механічним приводом;

6) з тепловим приводом;

7) з електроприводом.

11. Які природні джерела низькотемпературної теплоти можуть бути використані в теплонасосних установках?

1) поверхневі води;

5) сонячна радіація;

2) ґрунтові води;

6) трава;

3) повітря;

7) дрова;

4) ґрунт;

8) вітер.

12. Які вторинні енергоресурси можуть бути використані як джерела низькотемпературної теплоти для теплонасосних установок?

1) вода з охолодження конденсаторів парових турбін;

2) відпрацьована пара;

3) гаряче повітря;

4) горючий газ;

5) каналізаційні стоки;

6) біогаз;

7) тирса;

8) лушпиння.

13. Які теплові насоси називають бівалентними?

1) установка з двох теплових насосів;

2) з додатковим джерелом теплоти;

3) установка з трьох теплових насосів;

4) з можливістю використання двох джерел низькотемпературної теплоти.

14. Які недоліки абсорбційних теплонасосних установок?

1) використання високотемпературних теплоносіїв;

2) низький коефіцієнт перетворення;

3) використання холодних теплоносіїв;

4) ефект термохімічних реакцій.

15. Від яких чинників залежить значення коефіцієнта перетворення парокompресійної ТНУ?

1) температур високотемпературного та низькотемпературного джерела теплоти;

2) термодинамічних властивостей робочого тіла;

3) особливостей термодинамічного циклу ТН;

4) технічної досконалості конструкції теплового насоса.

16. Який вираз має рівняння теплового балансу парокompресійної теплонасосної установки?

1) $Q_K = N_{KM} + Q_B$;

4) $Q_B = Q_K + N_{KM}$;

2) $Q_K = N_{KM} - Q_B$;

5) $Q_{a6} + Q_K = Q_G + Q_H$;

3) $N_{KM} = Q_K + Q_B$;

6) $Q_{a6} - Q_K = Q_G + Q_H$.

17. Як визначається коефіцієнт перетворення (трансформації) теплоти в парокompресійній теплонасосній установці?

1) $(Q_{a6} + Q_K)/Q_G$;

3) Q_K/N_{KM} ;

2) $(Q_{a6} - Q_K)/Q_G$;

4) $Q_K - N_{KM}$.

18. Як залежить значення коефіцієнта перетворення теплонасосної установки від температур випаровування та конденсації?

1) не залежить;

2) його значення прямо пропорційне різниці цих температур;

3) його значення тим більше, чим менша різниця цих температур.

19. Які переваги абсорбційних теплонасосних установок порівняно з парокompресійними?

1) використання теплової енергії для привода;

2) використання електричної енергії для привода;

3) вище значення коефіцієнта перетворення.

20. Як визначається коефіцієнт перетворення (трансформації) теплоти в абсорбційних теплонасосних установках?

1) $(Q_{a6} + Q_K)/Q_G$;

2) $(Q_{a6} - Q_K)/Q_G$;

3) Q_K/N_{KM} .

Тест 2. Показники роботи парокompресійної ТНУ

1. Як визначається дійсний робочий теплоперепад в компресорі?

1) $h_p = h_2 - h_1$;

4) $h_p = h_3 - h_{2a}$;

2) $h_p = h_{2a} - h_1$;

5) $h_p = h_1 - h_{2a}$.

3) $h_p = h_{2a} - h_3$;

2. Як визначається питома теплота, підведена у випарник?

1) $q_b = h_1 - h_4$;

4) $q_b = h_{2a} - h_1$;

2) $q_b = h_2 - h_4$;

5) $q_b = h_2 - h_3$.

3) $q_b = h_3 - h_4$;

3. Як визначається питома теплота, відведена з конденсатора?

1) $q_k = h_1 - h_4$; 4) $q_k = h_{2a} - h_3$;

2) $q_k = h_2 - h_4$; 5) $q_k = h_{2a} - h_1$.

3) $q_k = h_2 - h_3$;

4. Які значення може приймати коефіцієнт перетворення теплового насоса?

1) 1; 3) 0;

2) <1 ; 4) >1 .

5. Який із законів термодинаміки покладений у принцип роботи теплового насоса?

1) перший закон термодинаміки;

2) другий закон термодинаміки;

3) узагальнені рівняння термодинаміки.

6. Як здійснюється перенесення теплоти у теплому насосі?

1) з нижчого температурного рівня на вищий;

2) з вищого температурного рівня на нижчий;

3) за законом Фур'є.

7. Який показник визначає термодинамічну досконалість теплового насоса?

1) коефіцієнт перетворення;

2) холодильний коефіцієнт;

3) термічний ККД;

4) ексергетичний ККД;

5) відносний внутрішній ККД;

6) фактор Карно.

8. Як визначається адіабатний теплоперепад в компресорі?

1) $h_{2a} - h_1$; 4) $h_2 - h_3$;

2) $h_2 - h_1$; 5) $h_1 - h_{2a}$;

3) $h_{2a} - h_3$; 6) $h_1 - h_2$.

9. Зазначте, який з термодинамічних процесів здійснюється у випарнику?

1) ізобарне підведення теплоти;

2) адіабатне підведення теплоти;

3) ізобарне відведення теплоти;

4) адіабатне відведення теплоти;

5) адіабатний стиск;

6) адіабатне розширення.

10. Зазначте, який з термодинамічних процесів здійснюється в конденсаторі?

1) адіабатний стиск;

2) адіабатне розширення;

3) адіабатне підведення теплоти;

4) адіабатне відведення теплоти;

5) ізобарне підведення теплоти;

6) ізобарне відведення теплоти.

11. Зазначте, який з термодинамічних процесів здійснюється у дроселі?

- 1) адіабатне розширення;
- 2) адіабатний стиск;
- 3) ізобарне розширення;
- 4) ізобарний стиск;
- 5) ізобарне підведення теплоти;
- 6) адіабатне підведення теплоти;
- 7) ізобарне відведення теплоти;
- 8) адіабатне відведення теплоти.

12. Зазначте, який з термодинамічних процесів здійснюється в компресорі?

- 1) адіабатний стиск;
- 2) політропний стиск;
- 3) адіабатне розширення;
- 4) політропне розширення;
- 5) адіабатне підведення теплоти;
- 6) політропне підведення теплоти;
- 7) ізобарне підведення теплоти;
- 8) ізобарне відведення теплоти;
- 9) політропне відведення теплоти.

13. Як визначається теплова потужність випарника?

- 1) $Q_k - N_{KM}$;
- 2) $N_{KM} - Q_k$;
- 3) $N_{KM} + Q_k$;
- 4) $1 - N_{KM}$;
- 5) $1 - Q_k$.

14. Як визначається теплова потужність конденсатора?

- 1) $N_{KM} + Q_B$;
- 2) $N_{KM} - Q_B$;
- 3) $Q_B - N_{KM}$;
- 4) $1 + Q_B + N_{KM}$;
- 5) $Q_B + N_{KM} - 1$.

15. Як визначається потужність компресора?

- 1) $Q_B - Q_k$;
- 2) $Q_k + Q_B$;
- 3) $Q_B + 1$;
- 4) $Q_k - Q_B$;
- 5) $Q_k + 1$.

16. Як визначається витрата холодоагенту?

- 1) Q_k/q_k ;
- 2) Q_k/q_B ;
- 3) N_{KM}/I_{KM} ;
- 4) Q_B/q_B ;
- 5) Q_k/I_{KM} ;
- 6) N_{KM}/q_k .

17. Як співвідносяться між собою значення холодильного коефіцієнта та коефіцієнта перетворення?

- 1) вони приймають однакові значення;
- 2) холодильний коефіцієнт більший за коефіцієнт перетворення;
- 3) холодильний коефіцієнт менший за коефіцієнт перетворення.

18. Як визначається коефіцієнт перетворення циклу Карно в ТНУ?

- 1) $T_k/(T_k - T_B)$;
- 2) $T_k/(T_k + T_B)$;
- 3) $T_B/(T_B - T_k)$;
- 4) $T_B/(T_k + T_B)$;
- 5) $(T_k/T_B) - 1$.

19. Як визначається коефіцієнт перетворення парокompресійної ТНУ?

- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1) Q_K/N_{KM} ; | 4) N_{KM}/Q_B ; |
| 2) N_{KM}/Q_K ; | 5) Q_K/Q_B ; |
| 3) Q_B/N_{KM} ; | 6) $Q_K - Q_B + 1$. |

20. Що характеризує коефіцієнт перетворення теплового насоса?

- 1) кількість відведеної теплоти на одиницю витраченої енергії;
- 2) кількість витраченої енергії на одиницю відведеної теплоти;
- 3) кількість витраченої енергії на одиницю підведеної теплоти;
- 4) кількість підведеної теплоти на одиницю витраченої енергії.

Тест 3. Ексергетичний аналіз ТНУ

1. Як визначається фактор Карно у випарнику?

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) $T_{HC}/T_B - 1$; | 4) $1 - T_{HC}/T_B$; |
| 2) $1 - T_{HC}/T_B$; | 5) не визначається. |
| 3) $T_{HC}/T_K - 1$; | |

2. Як визначається фактор Карно в конденсаторі?

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) $1 - T_{HC}/T_K$; | 4) $T_{HC}/T_B - 1$; |
| 2) $1 - T_{HC}/T_B$; | 5) не визначається. |
| 3) $T_{HC}/T_K - 1$; | |

3. Як визначається фактор Карно в компресорі?

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1) $T_{HC}/T_K - 1$; | 3) $1 - T_{HC}/T_K$; |
| 2) не визначається; | 4) $T_{HC}/T_K + 1$. |

4. Який вираз має рівняння енергетичного балансу теплового насоса?

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1) $q_K = q_B + l_{KM}$; | 3) $l_{KM} = q_B + q_K$; |
| 2) $q_B = q_K = l_{KM}$; | 4) $q_B = q_K + l_{KM}$. |

5. Який вираз має рівняння ексергетичного балансу теплового насоса?

- | | |
|--|--|
| 1) $e_{під} = e_{від} - \Delta e_{вт}$; | 3) $e_{від} = e_{під} + \Delta e_{вт}$; |
| 2) $e_{під} = e_{від} + \Delta e_{вт}$; | 4) $e_{від} = e_{під} - \Delta e_{вт}$. |

6. За яким із запропонованих співвідношень можна визначити коефіцієнт перетворення ТНУ?

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1) Q_K/N_{KM} ; | 4) N_{KM}/Q_B ; |
| 2) Q_B/N_{KM} ; | 5) Q_K/Q_B ; |
| 3) N_{KM}/Q_K ; | 6) Q_B/Q_K . |

7. За яким із запропонованих співвідношень можна визначити ексергетичний ККД ТНУ?

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1) $e_{від}/e_{під}$; | 3) $e_{під}/e_{від} - 1$; |
| 2) $e_{під}/e_{від}$; | 4) $e_{від}/e_{під} - 1$. |

8. Зазначте, в якому з елементів ТНУ визначаються внутрішні втрати ексергії?

- | | |
|---------------|-----------------|
| 1) випарник; | 3) конденсатор; |
| 2) компресор; | 4) дросель. |

9. Зазначте, в якому з елементів ТНУ визначаються зовнішні втрати ексергії?

- 1) дросель; 3) компресор;
2) випарник; 4) конденсатор.

10. Як визначаються втрати ексергії у випарнику?

- 1) $T_{nc}(s_2 - s_1)$; 4) $(e_4 - e_1) + e_{qb}$;
2) $T_{nc}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_4 - e_1) - e_{qb}$.

3) $(e_2 - e_3) - e_{qk}$;

11. Як визначаються втрати ексергії в конденсаторі?

- 1) $T_{nc}(s_2 - s_1)$; 4) $(e_4 - e_1) + e_{qb}$;
2) $T_{nc}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_4 - e_1) + e_{qk}$.

3) $(e_2 - e_3) - e_{qk}$;

12. Як визначаються втрати ексергії в компресорі?

- 1) $T_{nc}(s_2 - s_1)$; 4) $T_{nc}(s_1 - s_3)$;
2) $T_{nc}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_2 - e_3) - e_{qk}$;

3) $T_{nc}(s_2 - s_3)$; 6) $(e_4 - e_1) + e_{qb}$.

13. Як визначаються втрати ексергії в дроселі?

- 1) $T_{nc}(s_2 - s_1)$; 4) $T_{nc}(s_2 - s_3)$;
2) $T_{nc}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_2 - e_3) - e_{qk}$;

3) $T_{nc}(s_3 - s_4)$; 6) $(e_4 - e_1) + e_{qb}$.

14. Що називають фактором Карно?

- 1) ексергетичну температурну функцію;
2) ексергію теплового потоку;
3) анергію теплового потоку;
4) відношення ексергії до анергії теплового потоку;
5) відношення анергії до ексергії теплового потоку.

15. Що називають ексергією теплового потоку?

1) кількість теплоти, яку можна отримати від системи при її оборотно-приведенні у рівновагу з навколишнім середовищем;

2) кількість роботи, яку можна отримати від системи при її оборотному приведенні у рівновагу з навколишнім середовищем;

3) міру втрати роботоздатності системи.

16. Як визначається ексергія теплового потоку?

1) $e = a - 1$; 3) $a = q + e$;

2) $e = q - a$; 4) $q = a + e$.

17. Як визначається анергія теплоти?

1) $a = q$; 3) $a = q - 1$;

2) $a = e$; 4) $a = q - e$.

18. Як співвідносяться між собою значення теплового потоку, ексергії та анергії теплоти?

1) $q = a + e$; 3) $a = e + q$;

2) $e = a + q$; 4) $q = a - e$.

19. Який показник визначає термодинамічну досконалість теплового насоса?

- 1) коефіцієнт перетворення;
- 2) холодильний коефіцієнт;
- 3) термічний ККД;
- 4) ексергетичний ККД;
- 5) відносний внутрішній ККД;
- 6) фактор Карно.

20. Як визначається коефіцієнт перетворення теоретичного циклу ТНУ?

- 1) $T_k/(T_k - T_b)$;
- 2) $T_k/(T_k + T_b)$;
- 3) $T_b/(T_b - T_k)$;
- 4) $T_b/(T_k + T_b)$;
- 5) $(T_k/T_b) - 1$.

Тест 4. Теплонасосні станції

1. Що називають теплонапосною станцією?

1) комплексне енергетичне підприємство, призначене для централизованого теплопостачання;

- 2) насосну станцію, що перекачує гарячу воду;
- 3) насосну станцію, що перекачує теплу воду.

2. Як визначити витрату умовного палива на компресор ТНУ?

- 1) $Q_k / (Q_{\text{нп}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$;
- 2) $N_{\text{км}} / (Q_{\text{нп}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$;
- 3) $Q_b / (Q_{\text{нп}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$.

3. Підігрівання якої води здійснюється в тепловому насосі у складі ТНС?

- 1) сирі;
- 2) живильної;
- 3) мережної;
- 4) котлової;
- 5) підживлювальної.

4. Яке обладнання може входити до складу теплонапосної станції?

- 1) водогрійний котел;
- 2) газова турбіна;
- 3) двигун внутрішнього згорання;
- 4) конденсатний насос.

5. Вкажіть діапазон температур оптимального підігріву теплоносія в ТНУ у складі ТНС:

- 1) 70 – 80 °С;
- 2) 50 – 60 °С;
- 3) 60 – 70 °С;
- 4) 65 – 75 °С;
- 5) 75 – 85 °С;
- 6) 55 – 65 °С.

6. Вкажіть температуру підігріву води в водогрійному котлі ТНС:

- 1) $T_{\text{вк}}$;
- 2) $T_{\text{тп}}$;
- 3) T_k ;
- 4) T_b ;
- 5) $T_{\text{зmv}}$;
- 6) $T_{\text{пмв}}$.

7. Як визначається навантаження водогрійного котла у складі ТНС?

- 1) пропорційно $(T_{\text{пмв}} - T_{\text{зmv}})$;
- 2) пропорційно $(T_{\text{пмв}} - T_{\text{тн}})$;
- 3) пропорційно $(T_{\text{зmv}} - T_{\text{тн}})$;
- 4) пропорційно $(T_{\text{тн}} - T_{\text{зmv}})$;
- 5) пропорційно $(T_{\text{к}} - T_{\text{зmv}})$;
- 6) пропорційно $(T_{\text{в}} - T_{\text{зmv}})$.

8. Як працює теплонасосна станція в літній період?

- 1) тільки тепловий насос;
- 2) тільки водогрійний котел;
- 3) працюють тепловий насос та водогрійний котел;
- 4) не працює.

9. Як працює теплонасосна станція в опалювальний період?

- 1) тільки тепловий насос;
- 2) тільки водогрійний котел;
- 3) працюють тепловий насос та водогрійний котел;
- 4) не працює.

10. Як визначається навантаження теплового насоса у складі ТНС?

- 1) пропорційно $(T_{\text{пмв}} - T_{\text{зmv}})$;
- 2) пропорційно $(T_{\text{пмв}} - T_{\text{тн}})$;
- 3) пропорційно $(T_{\text{тн}} - T_{\text{зmv}})$;
- 4) пропорційно $(T_{\text{к}} - T_{\text{зmv}})$;
- 5) пропорційно $(T_{\text{тн}} - T_{\text{пмв}})$.

11. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з електроприводом?

- 1) $V_{\text{тну}}$;
- 2) $V_{\text{вк}}$;
- 3) $V_{\text{тну}} + V_{\text{гту}}$;
- 4) $V_{\text{тну}} + V_{\text{вк}}$;
- 5) $V_{\text{тну}} + V_{\text{двз}}$;
- 6) $V_{\text{тну}} + V_{\text{двз}}$.

12. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з приводом від газової турбіни?

- 1) $V_{\text{тну}} + V_{\text{вк}}$;
- 2) $V_{\text{тну}} + V_{\text{гту}}$;
- 3) $V_{\text{гту}} + V_{\text{вк}}$;
- 4) $V_{\text{гту}}$;
- 5) $V_{\text{тну}}$;
- 6) $V_{\text{вк}}$.

13. Як визначається витрата умовного палива на ТНС з приводом від двигуна внутрішнього згорання?

- 1) $V_{\text{тну}} + V_{\text{вк}}$;
- 2) $V_{\text{тну}}$;
- 3) $V_{\text{вк}}$;
- 4) $V_{\text{тну}} + V_{\text{гту}}$;
- 5) $V_{\text{тну}} + V_{\text{двз}}$;
- 6) $V_{\text{двз}} + V_{\text{вк}}$;
- 7) $V_{\text{двз}}$.

14. Як визначається загальна теплова потужність ТНУ з приводом від ДВЗ?

- 1) $Q_{\text{тну}} + \Sigma Q_{\text{ок}}$;
- 2) $Q_{\text{тну}} + N_{\text{двз}}$;
- 3) $N_{\text{двз}} + \Sigma Q_{\text{ок}}$;
- 4) $N_{\text{двз}} + \Sigma Q_{\text{ок}}$.

15. Що може бути джерелом низькотемпературної теплоти для ТНС?

- 1) викиди промислових підприємств з температурою 120–140 °С;
- 2) зовнішнє повітря з температурою 5–25 °С;
- 3) сонячна енергія;
- 4) викиди промислових підприємств з температурою 20–40 °С;
- 5) теплота ґрунту;
- 6) викиди промислових підприємств з температурою 45–65 °С.

16. Як включений конденсатор теплового насоса в схемі ТНС?

- 1) включений перед водогрійним котлом;
- 2) включений після водогрійного котла;
- 3) паралельно з котлом.

17. Вкажіть температуру теплоносія на вході в конденсатор ТНУ у складі ТНС:

- | | |
|----------------|----------------|
| 1) $T_{ТН}$; | 5) $T_{ПМВ}$; |
| 2) $T_{ВК}$; | 6) $T_{К}$; |
| 3) $T_{ТНС}$; | 7) $T_{В}$. |
| 4) $T_{ЗМВ}$; | |

18. Вкажіть температуру теплоносія на виході з конденсатора ТНУ у складі ТНС:

- | | |
|----------------|---------------|
| 1) $T_{ПМВ}$; | 4) $T_{К}$; |
| 2) $T_{ЗМВ}$; | 5) $T_{В}$; |
| 3) $T_{ТН}$; | 6) $T_{ВК}$. |

19. Вкажіть температуру теплоносія на вході у водогрійний котел ТНС:

- | | |
|----------------|---------------|
| 1) $T_{ПМВ}$; | 4) $T_{В}$; |
| 2) $T_{К}$; | 5) $T_{ТН}$; |
| 3) $T_{ЗМВ}$; | 6) $T_{ВК}$. |

20. Вкажіть температуру теплоносія на виході з водогрійного котла ТНС:

- | | |
|----------------|----------------|
| 1) $T_{ТН}$; | 4) $T_{ЗМВ}$; |
| 2) $T_{ВК}$; | 5) $T_{К}$; |
| 3) $T_{ПМВ}$; | 6) $T_{В}$. |

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання : монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Янговский Е. И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е. И. Янговский, Ю. В. Пустовалов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 144 с.
3. Термодинамические диаграммы i-IgP для хладагентов. – М. : АВИСАНКО, 2003. – 50 с.
4. Ткаченко С. Й. Систематизація інформації з розробки, дослідження та впровадження теплонасосних установок / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – № 4. – С. 176–184.
5. Ткаченко С. Й. Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – № 3. – С. 136–141.
6. Остапенко О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – № 2. – С. 132–139.
7. Долинский А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 99–105.

Словник найбільш вживаних термінів

Абсолютний	absolute
Абсорбент	absorbent
Абсорбційний	absorption
Адіабатний	adiabatic
Адсорбційний	adsorption
Бінарний розчин	binary solution
Випарник	evaporator
Газ	gas
Газокомпресійний	gas compression
Густина	density
Джерела низькотемпературної теплоти	low temperature heat sources
Дросельний вентиль	throttle valve
Другий закон термодинаміки	second law of thermodynamics
Ексергія	exergy
Ексергетичний ККД	exergetic efficiency
Енергія	energy
Ентальпія	enthalpy
Ентропія	entropy
Закон	law
Загальний еквівалентний вплив потепління	total equivalent warming impact
Зворотний цикл	reverse cycle
Ідеальний	ideal
Изобарний	isobaric
ККД	efficiency
Коефіцієнт	coefficient
Коефіцієнт перетворення	coefficient of transformation
Компресійний	compression
Компресор	compressor
Конденсатор	condenser
Конденсація	condensation
Опалювальний коефіцієнт	heating coefficient
Пара	steam
Парокомпресійний	steam compression
Перегріта пара	superheating steam
Питомий	specific
Питомий об'єм	specific volume

Питома теплопродуктивність	specific heating productivity
Питома холодопродуктивність	specific cooling productivity
Політропний	polytropic
Потенціал глобального потепління	global warming potential
Потенціал озонowego руйнування	ozone depletion potential
Процес	process
Рівняння	equation
Робота	work
Робоче тіло	working body
Система	system
Сорбент	sorbent
Сорбційний	sorption
Стан	condition
Струминний	inkjet
Суха насичена пара	dry saturated steam
Температура	temperature
Тепловий насос	heat pump
Теплоємність	thermal capacity
Теплонасосна станція	heat pump station
Теплообмін	heat exchange
Теплота	heat
Теплохолодильна установка	heat refrigeratory installation
Термічний компресор	thermal compressor
Термодинамічний	thermodynamics
Термоелектричний	thermoelectric
Термотрансформатор	thermo-transformer
Технічна	technical
Тиск	pressure
Фаза	phase
Фазова діаграма	phase diagram
Холодоагент	refrigerant
Холодильний	refrigeratory
Холодильний коефіцієнт	refrigeratory coefficient
Холодильна машина	refrigeratory machine
Холодопродуктивність	cold productivity
Цикл	cycle
Цикл Карно	Carnot cycle

Навчальне видання

Остапенко Ольга Павлівна

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ. ТЕПЛОВІ НАСОСИ

Конспект лекцій

Редактор Є. Плетньова

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку 05.07.2017 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. 3,57.

Наклад 50 (1-й запуск 1-20) пр. Зам. № 2017-264.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38.

press.vntu.edu.ua; e-mail: kivc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р