

**Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів
з дисципліни «Холодильна техніка
та технологія». Частина 2 «Теплові насоси»
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» всіх форм навчання**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів
з дисципліни «Холодильна техніка
та технологія». Частина 2 «Теплові насоси»
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» всіх форм навчання**

Вінниця
ВНТУ
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 17.04.2014 р.)

Рецензенти :

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

Д. В. Степанов, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Холодильна техніка та технологія». Частина 2 «Теплові насоси» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» всіх форм навчання / Уклад. О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 61 с.

В методичних вказівках наведено програму вивчення дисципліни «Холодильна техніка та технологія» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика»). Подано приклади розрахунків термодинамічних циклів теплових насосів, ексергетичного аналізу циклів парокompресійних теплонасосних установок та теплонасосних станцій. В методичних вказівках передбачено завдання для самостійної роботи студентів: тестові завдання для самоперевірки знань студентів за основними темами та варіанти практичних завдань для самостійної роботи з індивідуальними числовими даними.

ЗМІСТ

Передмова.....	4
Перелік скорочень і абревіатур	5
1 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ.....	7
1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни.....	7
1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни.....	8
2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ	10
3 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ.....	36
4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.....	48
Література.....	54
Додатки.....	55
Додаток А. Lg P-h діаграма холодоагенту R717.....	56
Додаток Б. Lg P-h діаграма холодоагенту R134a.....	57
Додаток В. Lg P-h діаграма холодоагенту R600.....	58
Додаток Г. Lg P-h діаграма холодоагенту R600a.....	59

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки для самостійної роботи студентів з дисципліни «Холодильна техніка та технологія» (Частина 2. «Теплові насоси») призначені 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 вискоефективних режимів роботи систем тепло- і холодопостачання. Це потребує застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Холодильна техніка та технологія», для вирішення конкретних інженерних задач в галузі теплотехнології, тепло- та холодопостачання за допомогою методів термодинамічного та ексергетичного аналізу. 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.

В «Методичних вказівках...» наведено програму вивчення дисципліни «Холодильна техніка та технологія» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика»). Відмітна особливість запропонованих методичних вказівок полягає в тому, що в них широко подано приклади розрахунків термодинамічних циклів теплових насосів, ексергетичного аналізу циклів парокompресійних теплонасосних установок та теплонасосних станцій.

«Методичні вказівки...» передбачають завдання для самостійної роботи студентів: тестові завдання для самоперевірки знань студентів за основними темами та варіанти практичних завдань для самостійної роботи в табличному вигляді з індивідуальними числовими даними. «Методичні вказівки...» містять необхідні додатки, що полегшує їх використання для вирішення практичних завдань. Це дозволить студентам працювати самостійно і творчо.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даних «Методичних вказівок...» до друку.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І АБРЕВІАТУР

- ВК – водогрійний котел;
- ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
- ТН – тепловий насос;
- ТНУ – теплонасосна установка;
- ТНС – теплонасосна станція;
- ХА – холодоагент;
- b – питома витрата палива, кг/ГДж; кг/(кВт·год);
- e – питома ексергія, МДж/м³; 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; м³/с;
- C – питома теплоємність, кДж/(кг·°С);
- E – ексергетична потужність, МВт;
- G – масова витрата, кг/с;
- H – теплоперепад, кДж/кг;
- N – електрична потужність, МВт;
- Q – теплова потужність, МВт;
- Q_H^p – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м³;
- Q_{ny}^p – нижча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;
- T – температура, К
- T_{cp}^B – середньотермодинамічна температура теплоносія у випарнику, К;
- T_{cp}^K – середньотермодинамічна температура теплоносія в конденсаторі, К;
- β – частка теплової потужності ТНУ у складі ТНС;
- η – коефіцієнт корисної дії (ККД);
- η_K^H – ККД-нетто котельні;
- η_c^B – фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику;
- η_c^K – фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі;

Θ – величина недогріву, °С;

φ – коефіцієнт перетворення (опалювальний коефіцієнт).

Індекси:

а – адіабатний; в – випаровування; вг – відхідні гази; від – відведена теплота; відп – відпущена теплота; вк – водогрійний котел; г – гази; 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 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Програма вивчення варіативної навчальної дисципліни складена з урахуванням вимог освітньо-професійних програм підготовки бакалаврів на пряму підготовки 6.05060101 – «Теплоенергетика» за спеціальністю «Теплоенергетика».

Предметом вивчення навчальної дисципліни «Холодильна техніка та технологія» є принцип дії, проектування, технологічні схеми, експлуатація холодильних та теплонасосних установок, методи розрахунку відповідного обладнання.

Міждисциплінарні зв'язки. Вивчення дисципліни «Холодильна техніка та технологія» базується на матеріалах таких дисциплін: «Математика», «Фізика», «Гідрогазодинаміка», «Технічна термодинаміка», «Тепломасообмін». Дисципліна дозволяє поглибити вивчення таких дисциплін: «Джерела тепlopостачання промислових підприємств», «Проектування теплоенергетичних та теплотехнологічних систем», «Експлуатація, випробування та налагодження теплоенергетичного і теплотехнологічного обладнання».

Програма навчальної дисципліни складається із семи змістових модулів.

Змістовий модуль 1. Теоретичні основи процесів холодильної (*refrigeratory*) техніки.

Змістовий модуль 2. Холодильники. Холодильні установки (*refrigeratory installations*).

Змістовий модуль 3. Цикли холодильних машин. Обладнання.

Змістовий модуль 4. Технології виробництва льоду та системи кондиціонування.

Змістовий модуль 5. Теоретичні основи процесів в теплових насосах.

Змістовий модуль 6. Аналіз показників роботи теплових насосів (*heat pumps*).

Змістовий модуль 7. Схемні рішення теплонасосних установок.

1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета викладання дисципліни «Холодильна техніка та технологія» – надати студентам необхідні теоретичні та практичні знання про принцип дії, проектування, технологічні схеми, експлуатацію холодильних та теплонасосних установок, про методи розрахунку відповідного обладнання.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Холодильна техніка та технологія» є:

– формування у студентів навичок виконання розрахунків обладнання та схем холодильних та теплонасосних установок;

– розуміння і засвоєння робочих процесів та принципів побудови холодильних та теплонасосних установок;

– отримання навичок аналізу отриманих рішень і прийняття рішень за результатами розрахунків;

– одержання теоретичних навичок для вивчення дисциплін, які викладатимуться в подальшому;

– навчання користуватись науковою, довідковою та нормативною літературою, знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

– **знати:** термодинамічні основи роботи холодильної техніки; особливості компресійних та абсорбційних холодильних машин; обладнання холодильних установок; особливості проектування теплообмінного обладнання, теплоізоляції, холодильних камер; технологічні схеми з тепловими насосами; режими роботи теплонасосних станцій;

– **вміти:** виконувати інженерно-технічні розрахунки; аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами цих розрахунків; користуватись науковою, довідковою та нормативною літературою; знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань.

1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Теоретичні основи процесів холодильної техніки.

Тема 1. Теоретичні основи процесів холодильної техніки.

Вступ. Фізичні принципи отримання холоду. Визначення холодильних установок. Промислові технології, що використовують холод. Класифікація холодильних установок і станцій. Термодинамічні основи роботи холодильної техніки. Теплові діаграми.

Змістовий модуль 2. Холодильники. Холодильні установки.

Тема 2. Конструкції холодильників.

Класифікація холодильників. Характеристика камер. Норми завантаження. Планування холодильників. Багатоповерхові холодильники. Теплоізоляція огорожувальних конструкцій. Конструкція стін, перекриттів, підлог холодильників. Конструкції підлог з обігріванням. Теплопритоки у камери. Зведена таблиця теплопротоків.

Тема 3. Системи охолодження. Схеми установок. Холодильні агенти (*refrigerants*) та холодоносії.

Способи охолодження. Системи охолодження. Схеми холодильних установок. Вибір розрахункового робочого режиму. Навантаження на ком-

пресор. Децентралізовані холодильні системи. Розсольні холодильні системи. Фреонові холодильні системи. Холодильні агенти та холодоносії. Екологічні показники робочих тіл.

Змістовий модуль 3. Цикли холодильних машин. Обладнання.

Тема 4. Цикли холодильних машин.

Газові холодильні машини (*gas refrigeratory machines*). Одно- та багатоступеневі парокомпресійні холодильні машини (*steam compression refrigeratory machines*). Абсорбційні (*absorption*) холодильні установки.

Тема 5. Обладнання холодильних установок.

Теплообмінні апарати холодильних установок. Підбір випарників (*evaporators*), конденсаторів (*condensers*), компресорів (*compressors*). Розсільні випарники.

Змістовий модуль 4. Технології виробництва льоду та системи кондиціонування.

Тема 6. Холодильні технології виробництва льоду та кондиціонування.

Холодильне обладнання систем кондиціонування повітря. Виробництво водяного льоду. Виробництво сухого льоду. Концентрування продуктів виморожуванням. Холодильний транспорт. Системи акумулювання та транспортування теплоти та холоду.

Змістовий модуль 5. Теоретичні основи процесів в теплових насосах.

Тема 7. Теоретичні основи процесів в теплових насосах.

Перетворення енергії в теплових насосах. Класифікація теплових насосів. Теплонасосне обладнання. Джерела низькотемпературної теплоти (*low temperature heat sources*). Абсорбційні теплові насоси.

Змістовий модуль 6. Аналіз показників роботи теплових насосів.

Тема 8. Аналіз показників роботи теплових насосів.

Термодинамічні основи ексергетичного аналізу теплонасосних установок. Техніко-економічні показники ТНУ. Інші методи аналізу теплонасосних установок.

Змістовий модуль 7. Схемні рішення теплонасосних установок та станцій.

Тема 9. Схеми теплонасосних установок (*heat pump station*).

Теплонасосні установки в індивідуальних будинках. Використання ТНУ в теплотехнології. Гаряче водопостачання з використанням ТНУ. Використання ТНУ в централізованому теплопостачанні.

Тема 10. Теплонасосні станції (*heat pump station*).

Поєднання ТНУ з котельними установками. Сучасний стан досліджень.

2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 2.1

В парокompресійній теплонасосній установці з тепловою потужністю випарника $Q_B = 21$ МВт температура (*temperature*) випаровування холодоагенту становить $t_B = 13$ °С. Температура конденсації $t_K = 65$ °С. Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у конденсаторі складає $\theta = 5$ °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$; а електромеханічний ККД $\eta_{ем} = 0,95$; ККД теплообмінників $\eta_{то} = 0,98$. Визначити температуру води на виході конденсатора t_{TH} , масову витрату холодоагенту, потужність компресора теплового насоса, теплову потужність конденсатора, коефіцієнт перетворення (*coefficient of transformation*) реального теплонасосного циклу та циклу Карно (*Carnot cycle*).

Розв'язання

Принципова схема парокompресійної ТНУ показана на рис. 2.1.

Побудова циклу парокompресійної ТНУ на $\lg P$ - h діаграмі показана на рис. 2.2.

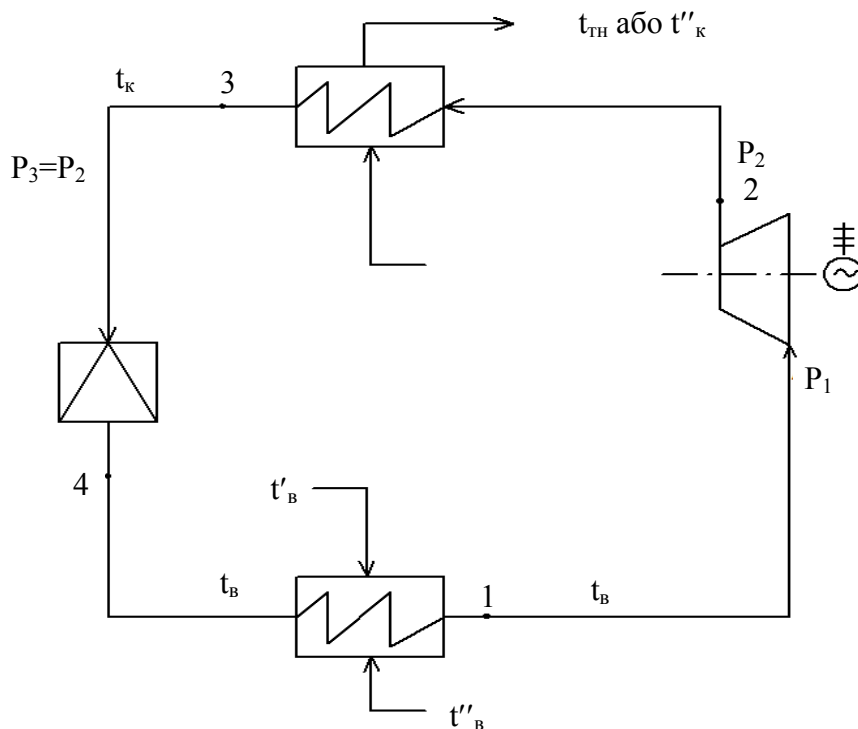


Рисунок 2.1 – Принципова схема парокompресійної ТНУ

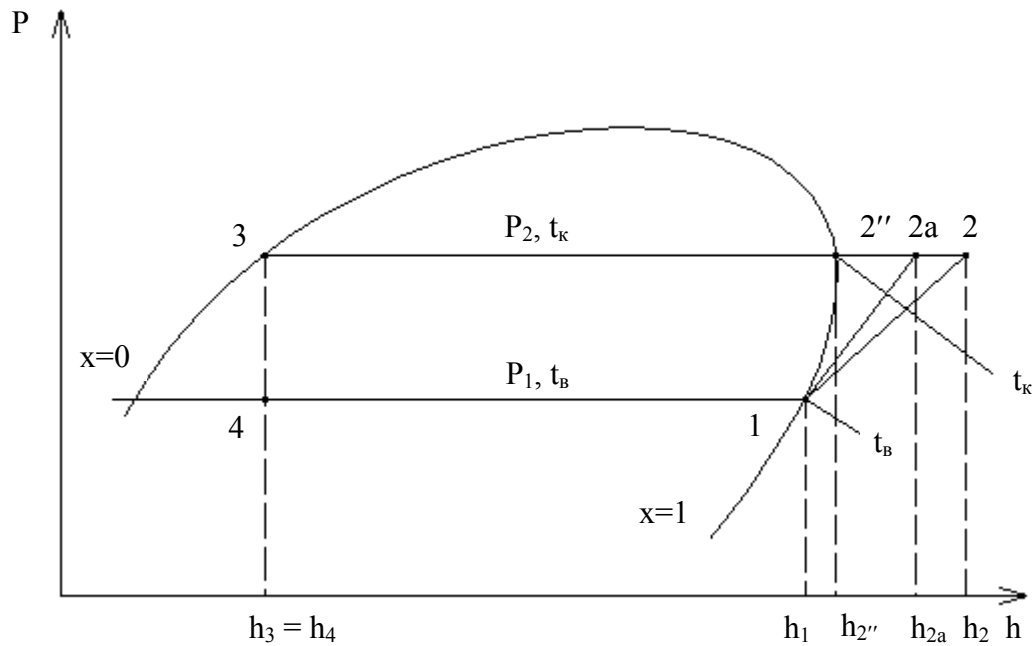


Рисунок 2.2 – Цикл парокомпресійної ТНУ на lg P-h діаграмі

Будуємо цикл парокомпресійної ТНУ на діаграмі та визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу:

$$h_1 = 1675 \text{ кДж/кг}; h_3 = h_4 = 710 \text{ кДж/кг}; h_{2a} = 1897 \text{ кДж/кг}.$$

Визначаємо температуру води на виході з конденсатора теплового насоса

$$t_{\text{ТН}} = t_{\text{к}} - \theta = 65 - 5 = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_{\text{в}} = h_1 - h_4 = 1675 - 710 = 965 \text{ кДж/кг}.$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{\text{кМО}} = h_{2a} - h_1 = 1897 - 1675 = 222 \text{ кДж/кг}.$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{кМ}} = \frac{H_a}{\eta_{\text{oi}}^{\text{кМ}}} = \frac{222}{0,75} = 296 \text{ кДж/кг}.$$

Дійсна ентальпія холодоагенту на виході з компресора, в точці 2, (рис. 2.2)

$$h_2 = h_1 + H_p = 1675 + 296 = 1971 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_k = h_2 - h_3 = 1971 - 710 = 1261 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата холодоагенту

$$G_{\text{ха}} = \frac{Q_{\text{в}} \cdot 10^3}{q_{\text{в}}} = \frac{21 \cdot 10^3}{965} = 21,76 \text{ кг/с.}$$

Потужність, яка витрачається на компресор,

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_p}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{21,76 \cdot 296}{0,95 \cdot 10^3} = 6,78 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність конденсатора

$$Q_k = G_{\text{ха}} \cdot q_k \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 10^3 = 21,76 \cdot 1261 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} = 26,89 \text{ МВт}$$

або з рівняння (*equation*) енергетичного балансу ТНУ

$$Q_k = N_{\text{км}} + Q_{\text{в}} = 6,78 + 21 = 27,78 \text{ МВт.}$$

Примітка. Рівняння енергетичного балансу ТНУ має похибку до 5%.

Коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу

$$\varphi = \frac{Q_k}{N_{\text{км}}} = \frac{26,89}{6,78} = 3,976.$$

Коефіцієнт перетворення циклу Карно (теоретичний)

$$\varphi_T = \frac{T_k}{T_k - T_{\text{в}}} = \frac{338}{338 - 286} = 6,5.$$

Приклад 2.2

У випарник парокомпресійної теплонасосної установки надходить вода з температурою $t'_{\text{в}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, а виходить з температурою $t''_{\text{в}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплова

потужність випарника складає $Q_B = 9$ МВт. Температура навколишнього середовища складає $T_{nc} = 293$ К. Температури води на вході та виході з конденсатора складають відповідно $t'_k = 50$ °С і $t''_k = 60$ °С. Холодоагентом є аміак. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$, а електромеханічний ККД $\eta_{ем} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{то} = 0,98$. Величина недогріву води у випарнику та конденсаторі складає $\theta = 5$ °С.

Визначити масову витрату холодоагенту, потужність компресора, теплову потужність конденсатора, ексергетичну потужність підведеної та відведеної теплоти, ексергетичний ККД теплонасосної установки. Навести схему ТНУ та зображення циклу на $\lg P-h$ діаграмі.

Розв'язання

Принципова схема парокомпресійної ТНУ показана на рис. 2.1.

Побудова циклу парокомпресійної ТНУ на $\lg P-h$ діаграмі показана на рис. 2.2.

Для побудови циклу парокомпресійної ТНУ на діаграмі необхідно визначити температури випаровування та конденсації холодоагенту.

Температура конденсації холодоагенту

$$t_k = t''_k + \theta = 60 + 5 = 65 \text{ °С.}$$

Температура випаровування холодоагенту

$$t_B = t'_B - \theta = 18 - 5 = 13 \text{ °С.}$$

Будуємо цикл парокомпресійної ТНУ на $\lg P-h$ діаграмі аміаку.

Визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу

$$h_1 = 1675 \text{ кДж/кг; } h_3 = h_4 = 710 \text{ кДж/кг; } h_{2a} = 1897 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_B = h_1 - h_4 = 1675 - 710 = 965 \text{ кДж/кг.}$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{кмо} = h_{2a} - h_1 = 1897 - 1675 = 222 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{км}} = \frac{H_a}{\eta_{\text{oi}}^{\text{км}}} = \frac{222}{0,75} = 296 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсна ентальпія холодоагенту на виході з компресора

$$h_2 = h_1 + H_p = 1675 + 296 = 1971 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_k = h_2 - h_3 = 1971 - 710 = 1261 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата холодоагенту

$$G_{\text{ха}} = \frac{Q_{\text{в}} \cdot 10^3}{q_{\text{в}}} = \frac{9 \cdot 10^3}{965} = 9,33 \text{ кг/с.}$$

Потужність, яка витрачається на компресор

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_p}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{9,33 \cdot 296}{0,95 \cdot 10^3} = 2,9 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність конденсатора

$$Q_k = G_{\text{ха}} \cdot q_k \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 10^{-3} = 9,33 \cdot 1261 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} = 11,53 \text{ МВт}$$

або з рівняння енергетичного балансу ТНУ

$$Q_k = N_{\text{км}} + Q_{\text{в}} = 2,9 + 9 = 11,9 \text{ МВт.}$$

Примітка. Рівняння енергетичного балансу ТНУ має похибку до 5%.

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти в конденсаторі

$$T_k^{\text{ср}} = 273 + \frac{t'_k + t''_k}{2} = 273 + \frac{50 + 60}{2} = 328 \text{ К.}$$

Середньотермодинамічна температура підведення теплоти у випарнику

$$T_B^{cp} = 273 + \frac{t'_B + t''_B}{2} = 273 + \frac{25 + 18}{2} = 294,5 \text{ К.}$$

Ексергетична потужність відведеної з конденсатора теплоти

$$E_{Q_K} = Q_K \cdot \left(1 - \frac{T_{HC}}{T_H^{cp}}\right) = 11,53 \left(1 - \frac{293}{328}\right) = 1,23 \text{ МВт.}$$

Ексергетична потужність підведеної у випарник теплоти

$$E_{Q_B} = Q_B \cdot \left(1 - \frac{T_{HC}}{T_B^{cp}}\right) = 9 \left(1 - \frac{293}{294,5}\right) = 0,046 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД теплонасосної установки

$$\eta_c = \frac{E_{Q_K}}{E_{Q_B} + N_{KM}} = \frac{1,23}{0,046 + 2,9} = 0,418.$$

Приклад 2.3

Теплова потужність конденсатора теплонасосної установки становить $Q_K = 10$ МВт. Температура конденсації холодоагенту $t_K = 75$ °С. Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у випарнику та конденсаторі складає $\theta = 3$ °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$, а електромеханічний ККД $\eta_{em} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{TO} = 0,98$. Температура води на вході в конденсатор становить $t'_K = 50$ °С.

Визначити температуру випаровування холодоагенту t_B , масову витрату холодоагенту, потужність компресора, теплову потужність випарника, коефіцієнт перетворення ТНУ та ексергетичний ККД. У випарник парокompресійної ТНУ надходить вода з температурою $t'_B = 25$ °С, а виходить з температурою $t''_B = 18$ °С. Температура навколишнього середовища $T_{HC} = 293$ К. Навести схему ТНУ та зображення циклу на lg P-h діаграмі.

Розв'язання

Принципова схема парокompресійної ТНУ показана на рис. 2.1.

Побудова циклу парокompресійної ТНУ на lg P-h діаграмі показана на рис. 2.2.

Для побудови циклу парокомпресійної ТНУ на діаграмі необхідно визначити температуру випаровування холодоагенту.

Температура випаровування холодоагенту

$$t_B = t_B'' - \theta = 18 - 3 = 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Будуємо цикл парокомпресійної ТНУ на lg P-h діаграмі аміаку.

Визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу

$$h_1 = 1678 \text{ кДж/кг}; h_3 = h_4 = 770 \text{ кДж/кг}; h_{2a} = 1930 \text{ кДж/кг}.$$

Визначаємо температуру води на виході з конденсатора теплового насоса

$$t_K'' = t_K - \theta = 75 - 3 = 72 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_B = h_1 - h_4 = 1678 - 770 = 908 \text{ кДж/кг}.$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{\text{кмо}} = h_{2a} - h_1 = 1930 - 1678 = 252 \text{ кДж/кг}.$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{км}} = \frac{H_a}{\eta_{oi}^{\text{км}}} = \frac{252}{0,75} = 336 \text{ кДж/кг}.$$

Дійсна ентальпія холодоагенту на виході з компресора

$$h_2 = h_1 + H_p = 1678 + 336 = 2014 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3 = 2014 - 770 = 1244 \text{ кДж/кг}.$$

Витрата холодоагенту

$$G_{\text{ха}} = \frac{Q_K \cdot 10^3}{q_K \cdot \eta_{\text{то}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{1244 \cdot 0,98} = 8,2 \text{ кг/с}.$$

Потужність, яка витрачається на компресор

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_{\text{р}}}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{8,2 \cdot 336}{0,95 \cdot 10^3} = 2,9 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність випарника

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{ха}} \cdot q_{\text{в}} \cdot 10^{-3} = 8,2 \cdot 908 \cdot 10^{-3} = 7,45 \text{ МВт}$$

або з рівняння енергетичного балансу ТНУ

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{к}} - N_{\text{км}} = 10 - 2,9 = 7,1 \text{ МВт.}$$

Примітка. Рівняння енергетичного балансу ТНУ має похибку до 5%.

Коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу

$$\varphi = \frac{Q_{\text{к}}}{N_{\text{км}}} = \frac{10}{2,9} = 3,448.$$

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти в конденсаторі

$$T_{\text{к}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t'_{\text{к}} + t''_{\text{к}}}{2} = 273 + \frac{50 + 72}{2} = 334 \text{ К.}$$

Середньотермодинамічна температура підведення теплоти у випарнику

$$T_{\text{в}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t'_{\text{в}} + t''_{\text{в}}}{2} = 273 + \frac{25 + 18}{2} = 294,5 \text{ К.}$$

Ексергетична потужність відведеної з конденсатора теплоти

$$E_{Q_{\text{к}}} = Q_{\text{к}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{нс}}}{T_{\text{к}}^{\text{ср}}}\right) = 10 \left(1 - \frac{293}{334}\right) = 1,23 \text{ МВт.}$$

Ексергетична потужність підведеної у випарник теплоти

$$E_{Q_{\text{в}}} = Q_{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{нс}}}{T_{\text{в}}^{\text{ср}}}\right) = 7,45 \left(1 - \frac{293}{294,5}\right) = 0,038 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД теплонапосної установки

Побудова циклу парокомпресійної ТНУ з проміжним перегрівником пари на $\lg P-h$ діаграмі наведена на рис. 2.4.

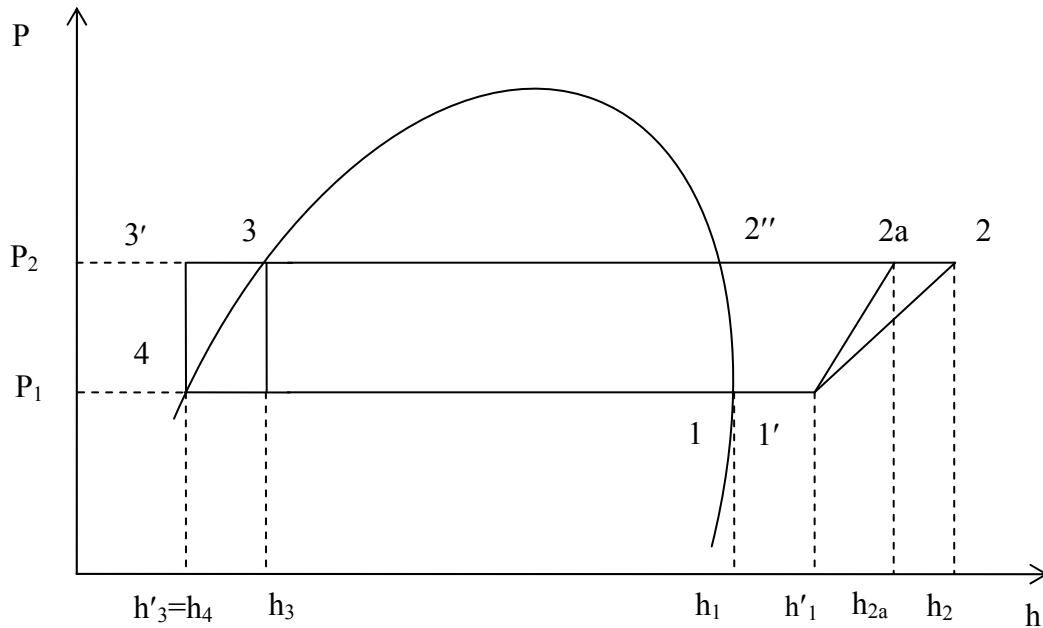


Рисунок 2.4 – Цикл парокомпресійної ТНУ з проміжним перегрівником пари на $\lg P-h$ діаграмі

Визначаємо температуру перегрітої пари холодоагенту на виході з перегрівника пари (охолодника конденсату) $t'_1 = t_b + \theta_{\text{п}} = 13 + 7 = 20^\circ\text{C}$.

З діаграми визначаємо ентальпії холодоагенту у відповідних точках циклу:

$$h'_1 = 420 \text{ кДж/кг}; h_3 = 313 \text{ кДж/кг}; h_1 = 415 \text{ кДж/кг}; h_{2a} = 415 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, яку сприймає пара холодоагенту в охолоднику

$$q_{\text{по}} = h'_1 - h_1 = 420 - 415 = 5 \text{ кДж/кг}.$$

Ентальпія рідкого холодоагенту на виході охолодника (ентальпія конденсату)

$$h'_3 = h_3 - q_{\text{по}} = 313 - 5 = 308 \text{ кДж/кг}.$$

Ентальпія холодоагенту після дроселя

$$h_4 = h'_3 = 308 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_v = h_1 - h_4 = 415 - 308 = 107 \text{ кДж/кг.}$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{\text{кмо}} = h_{2a} - h'_1 = 460 - 420 = 40 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{км}} = \frac{H_a}{\eta_{oi}^{\text{км}}} = \frac{40}{0,75} = 53,3 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсна ентальпія холодоагенту за компресором

$$h_2 = h'_1 + H_p = 420 + 53,3 = 473,3 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_k = h_2 - h_3 = 473,3 - 313 = 160,3 \text{ кДж/кг.}$$

Витрата холодоагенту

$$G_{\text{ха}} = \frac{Q_k \cdot 10^3}{q_k \cdot \eta_{\text{то}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{160,3 \cdot 0,98} = 63,6 \text{ кг/с.}$$

Потужність компресора

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_p}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{63,6 \cdot 53,3}{0,95 \cdot 10^3} = 3,5 \text{ МВт.}$$

Потужність випарника

$$Q_v = G_{\text{ха}} \cdot q_v \cdot 10^{-3} = 62,4 \cdot 107 \cdot 10^{-3} = 62,4 \cdot 107,10^{-3} = 6,68 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу

$$\varphi = \frac{Q_k}{N_{\text{км}}} = \frac{10}{3,5} = 2,86.$$

Коефіцієнт перетворення циклу Карно (теоретичний)

$$\varphi_T = \frac{T_K}{T_K - T_B} = \frac{353}{353 - 286} = 6,27.$$

Приклад 2.5

Теплова потужність теплонасосної станції $Q_{\text{ТНС}} = 20$ МВт. Температура прямої мережної води $t_{\text{ПМВ}} = 130$ °С, зворотної – $t_{\text{ЗМВ}} = 65$ °С. Температури низькотемпературного джерела теплоти: на вході у випарник – $t'_B = 30$ °С, на виході – $t''_B = 23$ °С. Величина недогріву у випарнику та конденсаторі $\theta = 5$ °С. Температура конденсації холодоагенту $t_K = 80$ °С. Температура навколишнього середовища $t_{\text{НС}} = 20$ °С. Холодоагент – аміак. Відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}} = 0,75$; електромеханічний $\eta_{\text{ем}} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{\text{ТО}} = 0,98$. Нижча теплота згорання робочого палива $Q_{\text{Н}}^p = 33,7$ МДж/м³. ККД – нетто котельні $\eta_{\text{к}}^{\text{H}} = 0,8$. Компресор ТНУ має електричний привод. ККД електростанції $\eta_{\text{ес}} = 0,36$. ККД електричних мереж $\eta_{\text{ел.мер}} = 0,95$.

Визначити потужність компресора, конденсатора, випарника ТНУ, потужність котла, коефіцієнт перетворення ТНУ, витрату умовного палива ТНУ, ТНС; ексергетичну потужність підведеної та відведеної у ТНС теплоти, ексергетичні ККД ТНУ, котельні, ТНС; економію умовного та робочого палива за рахунок використання ТНУ, питомі витрати умовного палива ТНУ, ТНС, котельні; частку теплової потужності ТНУ.

Розв'язання

Принципова схема теплонасосної станції показана на рис. 2.5.

Побудова циклу парокомпресійної ТНУ на lg P-h діаграмі наведена на рис. 2.2.

Температура випаровування холодоагенту

$$t_B = t''_B - \theta = 23 - 6 = 18 \text{ °С.}$$

Будуємо цикл парокомпресійної ТНУ на lg P-h діаграмі аміаку.

Визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу

$$h_1 = 1680 \text{ кДж/кг; } h_3 = h_4 = 800 \text{ кДж/кг; } h_{2a} = 1920 \text{ кДж/кг.}$$

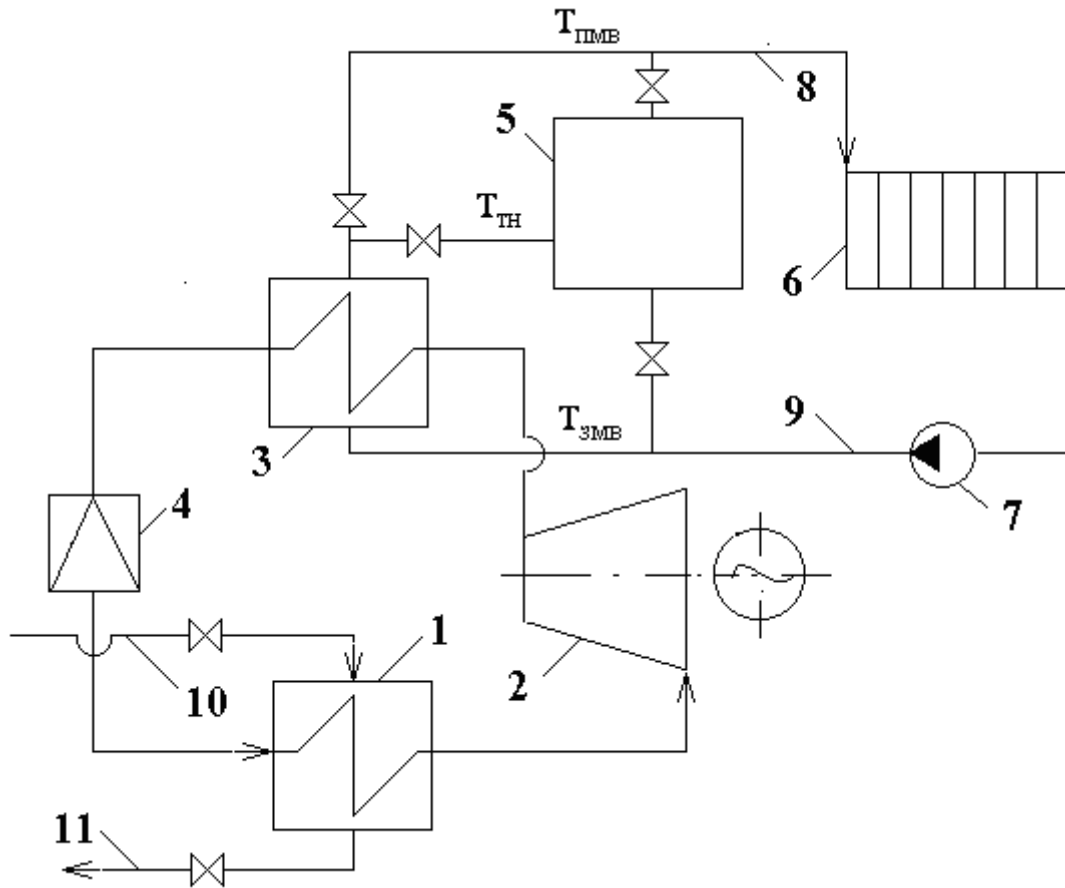


Рисунок 2.5 – Схема теплонасосної станції: 1 – випарник ТНУ; 2 – компресор з електроприводом; 3 – конденсатор ТНУ; 4 – дросельний вентиль; 5 – водогрійний котел; 6 – теплові споживачі; 7 – мережний насос; 8 і 9 – лінії прямої та зворотної мережної води; 10 і 11 – лінії низькотемпературного джерела енергії; $T_{ТН}$ – температура підігрітої води в ТНУ; $T_{ПМВ}$ і $T_{ЗМВ}$ – температура прямої та зворотної мережної води в системі тепlopостачання

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{кмо} = h_{2a} - h_1 = 1920 - 1680 = 240 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{км} = \frac{H_a}{\eta_{oi}^{км}} = \frac{240}{0,75} = 320 \text{ кДж/кг.}$$

Ентальпія холодоагенту в точці 2 (див. рис. 2.2)

$$h_2 = h_1 + H_p = 1680 + 320 = 2000 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_B = h_1 - h_4 = 1680 - 800 = 880 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3 = 2000 - 880 = 1200 \text{ кДж/кг.}$$

Температура води на виході з конденсатора

$$t_{TH} = t_K - \theta = 80 - 5 = 75 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Витрата мережної води, що циркулює в системі тепlopостачання

$$G_{MB} = \frac{Q_{TC} \cdot 10^3}{C_{PB} \cdot (t_{ПМВ} - t_{ЗМВ})} = \frac{20 \cdot 10^3}{4,19 \cdot (130 - 65)} = 73,435 \text{ кг/с.}$$

Теплова потужність конденсатора ТНУ

$$\begin{aligned} Q_{THY} = Q_K &= G_{MB} \cdot C_{PB} \cdot (t_{TH} - t_{ЗМВ}) \cdot 10^{-3} = \\ &= 73,435 \cdot 4,19 \cdot (75 - 65) \cdot 10^{-3} = 3,077 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Масова витрата холодоагенту

$$G_{XA} = \frac{Q_{THY} \cdot 10^3}{q_K \cdot \eta_{TO}} = \frac{3,077 \cdot 10^3}{1200 \cdot 0,98} = 2,616 \text{ кг/с.}$$

Потужність, яка витрачається на компресор

$$N_{KM} = \frac{G_{XA} \cdot H_p}{\eta_{EM} \cdot 10^3} = \frac{2,616 \cdot 320}{0,95 \cdot 10^3} = 0,881 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність випарника

$$Q_B = G_{XA} \cdot q_B \cdot 10^{-3} = Q_K - N_{KM} = 3,077 - 0,881 = 2,196 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт перетворення ТНУ

$$\varphi = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{N_{\text{КМ}}} = \frac{3,077}{0,881} = 3,491.$$

Витрата умовного палива на компресор ТНУ

$$B_y^{\text{ТНУ}} = \frac{N_{\text{КМ}}}{(Q_{\text{НУ}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ел.мер.}})} = \frac{0,881}{(29,3 \cdot 0,36 \cdot 0,95)} = 0,088 \text{ кг/с.}$$

Абсолютна середня температура мережної води в конденсаторі

$$T_{\text{К}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t_{\text{ТН}} + t_{\text{ЗМВ}}}{2} = 273 + \frac{75 + 65}{2} = 343 \text{ К.}$$

Фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі

$$\eta_{\text{с}}^{\text{К}} = 1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{К}}^{\text{ср}}} = 1 - \frac{(20 + 273)}{343} = 0,146.$$

Абсолютна середня температура низькотемпературного теплоносія у випарнику

$$T_{\text{В}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t'_{\text{В}} + t''_{\text{В}}}{2} = 273 + \frac{30 + 23}{2} = 299,5 \text{ К.}$$

Фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику

$$\eta_{\text{с}}^{\text{В}} = 1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{В}}^{\text{ср}}} = 1 - \frac{(20 + 273)}{299,5} = 0,022.$$

Ексергетичний ККД ТНУ

$$\eta_{\text{е}}^{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{К}}}{[Q_{\text{В}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{В}} + N_{\text{КМ}}]} = \frac{3,077 \cdot 0,146}{[2,196 \cdot 0,022 + 0,881]} = 0,483.$$

Теплова потужність водогрійного котла у складі ТНС

$$Q_{\text{ВК}} = Q_{\text{ТС}} - Q_{\text{ТНУ}} = 20 - 3,077 = 16,923 \text{ МВт.}$$

Абсолютна середня температура мережної води у котлі

$$T_{\text{БК}}^{\text{CP}} = 273 + \frac{t_{\text{ТН}} + t_{\text{ПМВ}}}{2} = 273 + \frac{75 + 130}{2} = 375,5 \text{ К.}$$

Ексергетична потужність відведеної з котла теплоти

$$E_{Q_{\text{БК}}} = Q_{\text{БК}} \left(1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{БК}}^{\text{CP}}} \right) = 16,923 \left(1 - \frac{293}{375,5} \right) = 3,718 \text{ МВт.}$$

Витрата умовного палива на котел

$$B_{\text{у}}^{\text{БК}} = \frac{Q_{\text{БК}}}{(Q_{\text{НУ}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}})} = \frac{16,923}{(29,3 \cdot 0,8)} = 0,722 \text{ кг/с.}$$

Ексергетична потужність підведеної у котел теплоти

$$E_{\text{під}}^{\text{БК}} = 1,05 \cdot B_{\text{у}}^{\text{БК}} \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}} = 1,05 \cdot 0,722 \cdot 29,3 = 22,212 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД котельні у складі ТНС

$$\eta_{\text{е}}^{\text{БК}} = \frac{E_{Q_{\text{БК}}}}{E_{\text{під}}^{\text{БК}}} = \frac{3,718}{22,212} = 0,167.$$

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти у ТНС

$$T_{\text{ТНС}}^{\text{CP}} = 273 + \frac{t_{\text{ПМВ}} + t_{\text{ЗМВ}}}{2} = 273 + \frac{130 + 65}{2} = 370,5 \text{ К.}$$

Загальна ексергетична потужність теплоти, відпущеної ТНС

$$E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}} = Q_{\text{ТНС}} \left(1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{ТНС}}^{\text{CP}}} \right) = 20 \left(1 - \frac{(20 + 273)}{370,5} \right) = 4,184 \text{ МВт.}$$

Загальна витрата умовного палива теплонасосною станцією

$$B_{\text{у}}^{\text{ТНС}} = B_{\text{у}}^{\text{ТНУ}} + B_{\text{у}}^{\text{БК}} = 0,088 + 0,722 = 0,81 \text{ кг/с.}$$

Ексергетична потужність підведеної у ТНС теплоти

$$E_{\text{під}}^{\text{ТНС}} = 1,05 \cdot B_{\text{у}}^{\text{ТНС}} \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}} = 1,05 \cdot 0,81 \cdot 29,3 = 24,917 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД ТНС

$$\eta_e^{\text{ТНС}} = \frac{E_{\text{Відп}}^{\text{ТНС}}}{E_{\text{Під}}^{\text{ТНС}}} = \frac{4,184}{24,917} = 0,168.$$

Загальна витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ

$$B_y^{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{(Q_{\text{НУ}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}^{\text{н}})} = \frac{20}{(29,3 \cdot 0,8)} = 0,853 \text{ кг/с.}$$

Економія умовного палива за рахунок використання ТНС

$$\Delta B_y = B_y^{\text{заг}} - B_y^{\text{ТНС}} = 0,853 - 0,81 = 0,043 \text{ кг/с.}$$

Економія робочого палива за рахунок використання ТНС

$$\Delta B_p = \frac{\Delta B_y \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{р}}} = \frac{0,043 \cdot 29,3}{33,78} = 0,037 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Частка теплової потужності ТНС, що припадає на ТНУ

$$\beta = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{ТНС}}} = \frac{3,077}{20} = 0,154.$$

Процентна економія умовного палива за рахунок використання ТНС

$$\Delta B_y (\%) = \frac{(\Delta B_y \cdot 100)}{B_y^{\text{заг}}} = \frac{(0,043 \cdot 100)}{0,853} = 5,077 \%$$

Ексергетичний ККД котельні без ТНУ

$$\eta_e^{\text{кот}} = \frac{E_{\text{Відп}}^{\text{ТНС}}}{(1,05 \cdot B_y^{\text{заг}} \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}})} = \frac{4,184}{(1,05 \cdot 0,853 \cdot 29,3)} = 0,159.$$

Питома витрата умовного палива ТНУ

$$b_y^{\text{ТНУ}} = \frac{B_y^{\text{ТНУ}}}{[Q_{\text{к}} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,088}{[3,077 \cdot 10^{-3}]} = 28,584 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива котлом у складі ТНС

$$b_y^{\text{БК}} = \frac{B_y^{\text{БК}}}{[Q_{\text{БК}} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,722}{[16,923 \cdot 10^{-3}]} = 42,662 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива ТНС

$$b_y^{\text{ТНС}} = \frac{B_y^{\text{ТНС}}}{[Q_{\text{ТНС}} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,81}{[20 \cdot 10^{-3}]} = 40,496 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ

$$b_y^{\text{КОТ}} = \frac{B_y^{\text{КОТ}}}{[Q_{\text{ТНС}} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,853}{[20 \cdot 10^{-3}]} = 42,662 \text{ кг/ГДж.}$$

Приклад 2.6

Теплова потужність теплонасосної станції та теплових споживачів становить $Q_{\text{ТНС}} = Q_{\text{ТНС}} = 20$ МВт. Температура прямої мережної води $t_{\text{ПМВ}} = 130$ °С, зворотної – $t_{\text{ЗМВ}} = 65$ °С. Температури низькотемпературного джерела теплоти: на вході у випарник – $t'_в = 30$ °С; на виході – $t''_в = 23$ °С. Величина недогріву у випарнику та конденсаторі $\theta = 5$ °С. Холодоагент – аміак. Температура конденсації холодоагенту $t_{\text{К}} = 80$ °С. Температура навколишнього середовища $t_{\text{НС}} = 20$ °С. ККД теплообмінників $\eta_{\text{ТО}} = 0,98$. Привод компресора ТНУ від ДВЗ на природному газі. Температура повітря для спалювання палива у ДВЗ $t_{\text{ПОВ}} = 30$ °С. Коефіцієнт надлишку повітря у ДВЗ $\alpha = 1,05$. Відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}} = 0,75$; електромеханічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,95$. Теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 м^3 робочого палива $V^\circ = 9,52$ м³/м³. Питома витрата умовного палива ДВЗ за паспортними даними $b_y = 0,3322$ кг/(кВт·год). Температура відхідних газів після ДВЗ $t_{\text{Д}} = 475$ °С. Температура відхідних газів після утилізатора відхідних газів ДВЗ $t''_{\text{УТ}} = 140$ °С. Нижча теплота згорання робочого палива $Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 33,78$ МДж/м³. ККД-нетто котельні $\eta_{\text{К}}^{\text{H}} = 0,8$.

Визначити потужність компресора, конденсатора, випарника ТНУ, потужність котла, теплові потужності утилізатора та системи охолодження

ДВЗ, коефіцієнт перетворення ТНУ, витрату умовного палива ТНУ, ТНС; ексергетичну потужність підведеної та відведеної у ТНС теплоти, ексергетичні ККД ТНУ, котельні, ТНС; економію умовного палива за рахунок використання ТНУ, питомі витрати умовного палива ТНУ, ТНС, котельні; частку теплової потужності ТНУ.

Розв'язання

Принципова схема ТНС з приводом компресора ТНУ від газопоршневого двигуна та з утилізацією теплоти відхідних газів після ГПД показана рис. 2.6.

Побудова циклу парокомпресійної ТНУ на $\lg P-h$ діаграмі наведена на рис. 2.2.

Температура випаровування холодоагенту

$$t_B = t_B'' - \theta = 23 - 6 = 18 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Будуємо цикл парокомпресійної ТНУ на $\lg P-h$ діаграмі аміаку.

Визначаємо ентальпію холодоагенту у відповідних точках циклу

$$h_1 = 1680 \text{ кДж/кг}; h_3 = h_4 = 800 \text{ кДж/кг}; h_{2a} = 1920 \text{ кДж/кг}.$$

Адіабатний теплоперепад в компресорі

$$H_a = l_{\text{кмо}} = h_{2a} - h_1 = 1920 - 1680 = 240 \text{ кДж/кг}.$$

Дійсний робочий теплоперепад в компресорі

$$H_p = l_{\text{км}} = \frac{H_a}{\eta_{\text{oi}}^{\text{км}}} = \frac{240}{0,75} = 320 \text{ кДж/кг}.$$

Ентальпія холодоагенту в точці 2 (див. рис. 2.2)

$$h_2 = h_1 + H_p = 1680 + 320 = 2000 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, підведена до випарника

$$q_B = h_1 - h_4 = 1680 - 800 = 880 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, відведена з конденсатора

$$q_K = h_2 - h_3 = 2000 - 800 = 1200 \text{ кДж/кг}.$$

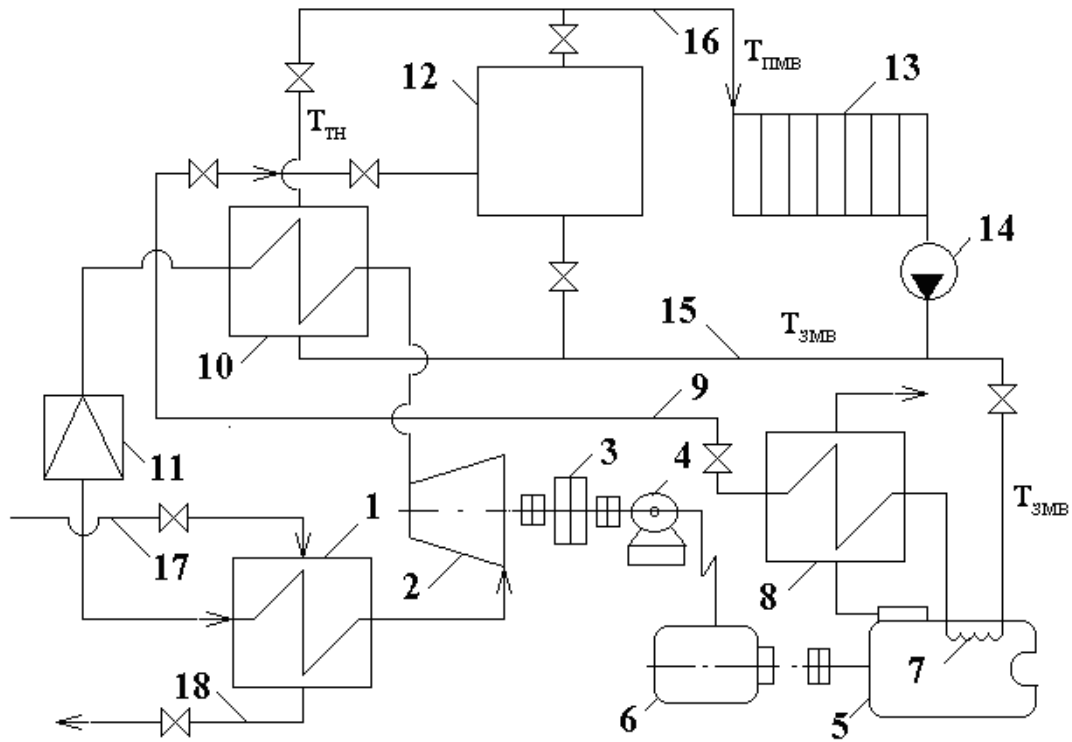


Рисунок 2.6 – Принципова схема ТНС з дизель-генераторним приводом компресора ТНУ і з утилізацією теплоти відхідних газів після дизеля:

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; $T_{ПМБ}$, $T_{ЗМБ}$ – температури прямої та зворотної мережної води в системі тепlopостачання, відповідно; $T_{ТН}$ – температура мережної води після підігрівання в ТНУ

Температура води на виході з конденсатора

$$t_{ТН} = t_k - \theta = 80 - 5 = 75 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Витрата мережної води, що циркулює в системі тепlopостачання

$$G_{\text{МВ}} = \frac{Q_{\text{ТС}} \cdot 10^3}{C_{\text{рв}} \cdot (t_{\text{ПМВ}} - t_{\text{ЗМВ}})} = \frac{20 \cdot 10^3}{4,19 \cdot (130 - 65)} = 73,435 \text{ кг/с.}$$

Теплова потужність конденсатора ТНУ

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТНУ}} = Q_{\text{к}} &= G_{\text{МВ}} \cdot C_{\text{рв}} \cdot (t_{\text{ТН}} - t_{\text{ЗМВ}}) \cdot 10^{-3} = \\ &= 73,435 \cdot 4,19 \cdot (75 - 65) \cdot 10^{-3} = 3,077 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Масова витрата холодоагенту

$$G_{\text{ха}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}} \cdot 10^3}{q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{то}}} = \frac{3,077 \cdot 10^3}{1200 \cdot 0,98} = 2,616 \text{ кг/с.}$$

Потужність, яка витрачається на компресор

$$N_{\text{км}} = \frac{G_{\text{ха}} \cdot H_{\text{р}}}{\eta_{\text{ем}} \cdot 10^3} = \frac{2,616 \cdot 320}{0,95 \cdot 10^3} = 0,881 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність випарника

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{ха}} \cdot q_{\text{в}} \cdot 10^{-3} = Q_{\text{к}} - N_{\text{км}} = 3,077 - 0,881 = 2,196 \text{ МВт.}$$

Ефективний ККД ДВЗ

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{0,123}{b_{\text{у}}} = 0,123 / 0,3322 = 0,37.$$

Повний ККД ДВЗ і електрогенератора

$$\eta_{\text{д}} = \eta_{\text{еф}} \cdot \eta_{\text{ем}} = 0,37 \cdot 0,95 = 0,35.$$

Питома витрата умовного палива на дизель-генератор

$$b_{\text{у}}^{\text{д}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{д}}} = \frac{0,123}{0,35} = 0,3514 \text{ кг/(кВт·год).}$$

Теоретична маса повітря для спалювання 1 м³ палива

$$M^{\circ} = V^{\circ} \cdot \rho = 9,52 \cdot 1,165 = 11,09 \text{ кг/м}^3,$$

де ρ – густина повітря при заданій температурі, кг/м^3 .

Питома витрата суміші повітря і палива

$$M_{\text{сум}} = 1 + \alpha \cdot M^{\circ} = 1 + 1,05 \cdot 11,09 = 12,65 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата умовного палива на ДВЗ для привода компресора

$$B_y^d = \frac{b_y^d \cdot N_{\text{км}}}{3,6} = \frac{(0,3514 \cdot 0,881)}{3,6} = 0,086 \text{ кг/с.}$$

Витрата робочого палива на ДВЗ

$$B_p^d = \frac{(B_y^d \cdot Q_{\text{HY}}^p)}{Q_H^p} = \frac{(0,086 \cdot 29,3)}{33,78} = 0,075 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Витрата відхідних газів після ДВЗ

$$G_{\text{вг}} = B_p^d \cdot M_{\text{сум}} = 0,075 \cdot 12,65 = 0,949 \text{ кг/с.}$$

Потужність утилізатора відхідних газів

$$\begin{aligned} Q_{\text{YT}} &= G_{\text{вг}} \cdot C_{\text{рг}} \cdot (t_d - t_{\text{YT}}'') \cdot \eta_{\text{то}} \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,949 \cdot 1,125 \cdot (475 - 140) \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} = 0,35 \text{ МВт,} \end{aligned}$$

де $C_{\text{рг}}$ – питома теплоємність газів після ДВЗ при середній температурі газів в утилізаторі, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Потужність системи охолодження ДВЗ

$$Q_{\text{ох}} = 0,2 \cdot B_p^d \cdot Q_H^p \cdot \eta_{\text{то}} = 0,2 \cdot 0,075 \cdot 33,78 \cdot 0,98 = 0,497 \text{ МВт.}$$

Загальна потужність теплоутилізаційного устаткування ДВЗ

$$\Sigma Q_{\text{YT}} = Q_{\text{YT}} + Q_{\text{ох}} = 0,35 + 0,497 = 0,847 \text{ МВт.}$$

Загальна теплова потужність ТНУ

$$Q_{\text{ТНУ}} = Q_{\text{К}} + \Sigma Q_{\text{УТ}} = 3,077 + 0,847 = 3,924 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність водогрійного котла у складі ТНС

$$Q_{\text{ВК}} = Q_{\text{Тс}} - Q_{\text{ТНУ}} = 20 - 3,924 = 16,076 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт перетворення ТНУ

$$\varphi = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{N_{\text{КМ}}} = \frac{3,924}{0,881} = 4,454.$$

Абсолютна середня температура мережної води в конденсаторі

$$T_{\text{К}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t_{\text{ТН}} + t_{\text{ЗМВ}}}{2} = 273 + \frac{75 + 65}{2} = 343 \text{ К.}$$

Фактор Карно для відведеної теплоти в конденсаторі

$$\eta_{\text{К}}^{\text{К}} = 1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{К}}^{\text{ср}}} = 1 - \frac{(20 + 273)}{343} = 0,146.$$

Абсолютна середня температура низькотемпературного теплоносія у випарнику

$$T_{\text{В}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t'_{\text{В}} + t''_{\text{В}}}{2} = 273 + \frac{30 + 23}{2} = 299,5 \text{ К.}$$

Фактор Карно для підведеної теплоти у випарнику

$$\eta_{\text{С}}^{\text{В}} = 1 - \frac{T_{\text{НС}}}{T_{\text{В}}^{\text{ср}}} = 1 - \frac{(20 + 273)}{299,5} = 0,022.$$

Ексергетичний ККД ТНУ

$$\eta_{\text{е}}^{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}} \cdot \eta_{\text{С}}^{\text{К}}}{[Q_{\text{В}} \cdot \eta_{\text{С}}^{\text{В}} + N_{\text{КМ}}]} = \frac{3,924 \cdot 0,146}{[2,196 \cdot 0,022 + 0,881]} = 0,617.$$

Абсолютна середня температура мережної води у котлі

$$T_{\text{ВК}}^{\text{ср}} = 273 + \frac{t_{\text{ТН}} + t_{\text{ПМВ}}}{2} = 273 + \frac{75 + 130}{2} = 375,5 \text{ К.}$$

Ексергетична потужність відведеної з котла теплоти

$$E_{Q_{\text{BK}}} = Q_{\text{BK}} \left(1 - \frac{T_{\text{HC}}}{T_{\text{BK}}^{\text{cp}}} \right) = 16,076 \left(1 - \frac{293}{375,5} \right) = 3,532 \text{ МВт.}$$

Витрата умовного палива на котел у складі ТНС

$$B_{\text{y}}^{\text{BK}} = \frac{Q_{\text{BK}}}{(Q_{\text{HY}}^{\text{p}} \cdot \eta_{\text{K}}^{\text{H}})} = \frac{16,076}{(29,3 \cdot 0,8)} = 0,686 \text{ кг/с.}$$

Ексергетична потужність підведеної у котел теплоти

$$E_{\text{під}}^{\text{BK}} = 1,05 \cdot B_{\text{y}}^{\text{BK}} \cdot Q_{\text{HY}}^{\text{p}} = 1,05 \cdot 0,686 \cdot 29,3 = 21,105 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД котельні у складі ТНС

$$\eta_{\text{e}}^{\text{BK}} = \frac{E_{Q_{\text{BK}}}}{E_{\text{під}}^{\text{BK}}} = \frac{3,532}{21,105} = 0,167.$$

Середньотермодинамічна температура відведення теплоти у ТНС

$$T_{\text{ТНС}}^{\text{cp}} = 273 + \frac{t_{\text{ПМВ}} + t_{\text{ЗМВ}}}{2} = 273 + \frac{130 + 65}{2} = 370,5 \text{ К.}$$

Загальна ексергетична потужність теплоти, відпущеної ТНС

$$E_{\text{відп}}^{\text{ТНС}} = Q_{\text{TC}} \left(1 - \frac{T_{\text{HC}}}{T_{\text{ТНС}}^{\text{cp}}} \right) = 20 \left(1 - \frac{(20 + 273)}{370,5} \right) = 4,184 \text{ МВт.}$$

Загальна витрата умовного палива на ТНС з ДВЗ

$$B_{\text{уд}}^{\text{ТНС}} = B_{\text{y}}^{\text{д}} + B_{\text{y}}^{\text{BK}} = 0,086 + 0,686 = 0,772 \text{ кг/с.}$$

Ексергетична потужність підведеної у ТНС теплоти

$$E_{\text{під}}^{\text{ТНС}} = 1,05 \cdot B_{\text{уд}}^{\text{ТНС}} \cdot Q_{\text{HY}}^{\text{p}} = 1,05 \cdot 0,772 \cdot 29,3 = 23,751 \text{ МВт.}$$

Ексергетичний ККД ТНС

$$\eta_e^{\text{ТНСд}} = \frac{E_{\text{ВіДП}}^{\text{ТНС}}}{E_{\text{Під}}^{\text{ТНС}}} = \frac{4,184}{23,751} = 0,176.$$

Загальна витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ

$$B_y^{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{тс}}}{(Q_{\text{НУ}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}^{\text{н}})} = \frac{20}{(29,3 \cdot 0,8)} = 0,853 \text{ кг/с.}$$

Економія умовного палива за рахунок використання ТНС з приводом від ДВЗ

$$\Delta B_y^{\text{д}} = B_y^{\text{заг}} - B_{\text{уд}}^{\text{ТНС}} = 0,853 - 0,772 = 0,081 \text{ кг/с.}$$

Економія робочого палива за рахунок використання ТНС з ДВЗ

$$\Delta B_{\text{р}} = \frac{\Delta B_y^{\text{д}} \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{р}}} = \frac{0,081 \cdot 29,3}{33,78} = 0,07 \text{ кг/с.}$$

Частка теплової потужності ТНС, що припадає на ТНУ

$$\beta = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{Q_{\text{тс}}} = \frac{3,924}{20} = 0,196.$$

Процентна економія умовного палива за рахунок використання ТНС

$$\Delta B_y^{\text{д}} (\%) = \frac{(\Delta B_y^{\text{д}} \cdot 100)}{B_y^{\text{заг}}} = \frac{(0,081 \cdot 100)}{0,853} = 9,5 \text{ \%}.$$

Ексергетичний ККД системи без ТНУ

$$\eta_e^{\text{кот}} = \frac{E_{\text{ВіДП}}^{\text{ТНС}}}{(1,05 \cdot B_y^{\text{заг}} \cdot Q_{\text{НУ}}^{\text{р}})} = \frac{4,184}{(1,05 \cdot 0,853 \cdot 29,3)} = 0,159.$$

Питома витрата умовного палива ТНУ

$$b_y^{\text{ТНУ}} = \frac{B_y^{\text{д}}}{[Q_{\text{ТНУ}} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,086}{[3,6 \cdot 10^{-3}]} = 23,89 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива котлом у складі ТНС

$$b_{y}^{BK} = \frac{B_{y}^{BK}}{[Q_{BK} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,686}{[16,076 \cdot 10^{-3}]} = 42,66 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива ТНС

$$b_{y}^{TNS} = \frac{B_{y}^{TNS}}{[Q_{TNS} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,772}{[20 \cdot 10^{-3}]} = 38,6 \text{ кг/ГДж.}$$

Питома витрата умовного палива котельнею без роботи ТНУ

$$b_{y}^{KOT} = \frac{B_{y}^{KOT}}{[Q_{TNS} \cdot 10^{-3}]} = \frac{0,853}{[20 \cdot 10^{-3}]} = 42,66 \text{ кг/ГДж.}$$

3 ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

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) ті, що переносять теплоту від менш нагрітого тіла до більш нагрітого;

2) ті, що 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 стискання холодоагенту використовується механічний компресор;

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

3) ТН, в яких стискання 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 абсорбційними?
- 1) де процес сорбції здійснюється в усьому об'ємі абсорбенту;
 - 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 абсорбенту;
 - 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 Пельтьє.
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) парокompresійні;
 - 2) газокompresійні;
 - 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;
 - 2) ґрунтові води;
 - 3) повітря;
 - 4) ґрунт;
 - 5) сонячна радіація;
 - 6) трава;

7) дрова;

8) вітер.

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

1) вода після 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 парокомпресійної 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 парокомпресійної теплонасосної установки?

1) $Q_k = N_{km} + Q_b$;

4) $Q_b = Q_k + N_{km}$;

2) $Q_k = N_{km} - Q_b$;

5) $Q_{аб} + Q_k = Q_{г} + Q_{н}$;

3) $N_{km} = Q_k + Q_b$;

6) $Q_{аб} - Q_k = Q_{г} + Q_{н}$.

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

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 тепловому 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) адіабатне стиснення;
- 6) адіабатне розширення.

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

- 1) адіабатне стиснення;
- 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 дрo-селі?

- 1) адіабатне розширення;
- 2) адіабатне стиснення;
- 3) ізобарне розширення;
- 4) ізобарне стиснення;
- 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) адіабатне стиснення;
- 2) політропне стиснення;
- 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) $Q_k - N_{KM}$; | 4) $1 - N_{KM}$; |
| 2) $N_{KM} - Q_k$; | 5) $1 - Q_k$. |
| 3) $N_{KM} + Q_k$; | |

14. Як визначається теплова потужність конденсатора?

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

15. Як визначається потужність компресора?

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

16. Як визначається витрата холодоагенту?

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 1) Q_k/q_k ; | 4) Q_B/q_B ; |
| 2) Q_k/q_B ; | 5) Q_k/l_{KM} ; |
| 3) N_{KM}/l_{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 парокompresійної ТНУ?

- 1) Q_K/N_{KM} ;
- 2) N_{KM}/Q_K ;
- 3) Q_B/N_{KM} ;
- 4) N_{KM}/Q_B ;
- 5) Q_K/Q_B ;
- 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) $T_{HC}/T_B - 1$;
- 2) $1 - T_{HC}/T_B$;
- 3) $T_{HC}/T_K - 1$;
- 4) $1 - T_{HC}/T_B$;
- 5) не визначається.

2. Як визначається фактор Карно в конденсаторі?

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

3. Як визначається фактор Карно в компресорі?

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

4. Який вираз має рівняння енергетичного балансу теплового насоса?

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

5. Який вираз має рівняння ексергетичного балансу теплового насоса?

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

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

- 1) $Q_{\text{к}}/N_{\text{км}}$; 4) $N_{\text{км}}/Q_{\text{в}}$;
2) $Q_{\text{в}}/N_{\text{км}}$; 5) $Q_{\text{к}}/Q_{\text{в}}$;
3) $N_{\text{км}}/Q_{\text{к}}$; 6) $Q_{\text{в}}/Q_{\text{к}}$.

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

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

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) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_1)$; 4) $(e_4 - e_1) + e_{\text{qv}}$;
2) $T_{\text{нс}}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_4 - e_1) - e_{\text{qv}}$.
3) $(e_2 - e_3) - e_{\text{qк}}$;

11. Як визначаються втрати ексергії в конденсаторі?

- 1) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_1)$; 4) $(e_4 - e_1) + e_{\text{qv}}$;
2) $T_{\text{нс}}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_4 - e_1) + e_{\text{qк}}$.
3) $(e_2 - e_3) - e_{\text{qк}}$;

12. Як визначаються втрати ексергії в компресорі?

- 1) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_1)$; 4) $T_{\text{нс}}(s_1 - s_3)$;
2) $T_{\text{нс}}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_2 - e_3) - e_{\text{qк}}$;
3) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_3)$; 6) $(e_4 - e_1) + e_{\text{qv}}$.

13. Як визначаються втрати ексергії в дроселі?

- 1) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_1)$; 4) $T_{\text{нс}}(s_2 - s_3)$;
2) $T_{\text{нс}}(s_4 - s_3)$; 5) $(e_2 - e_3) - e_{\text{qк}}$;
3) $T_{\text{нс}}(s_3 - s_4)$; 6) $(e_4 - e_1) + e_{\text{qv}}$.

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 оборотному 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 роботоспроможності системи.

16. Як визначається ексергія теплового потоку?

- 1) $e = a - 1$;
- 2) $e = q - a$;
- 3) $a = q + e$;
- 4) $q = a + e$.

17. Як визначається анергія теплоти?

- 1) $a = q$;
- 2) $a = e$;
- 3) $a = q - 1$;
- 4) $a = q - e$.

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

- 1) $q = a + e$;
- 2) $e = a + q$;
- 3) $a = e + q$;
- 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 теплонасосною станцією?

1) комплексне енергетичне підприємство, призначене для централізованого тепlopостачання;

2) насосну станцію, що перекачує гарячу воду;

3) насосну станцію, що перекачує теплу воду.

2. Як визначити витрату умовного палива на компресор ТНУ?

1) $Q_K / (Q_{\text{НУ}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$; 3) $Q_B / (Q_{\text{НУ}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$.

2) $N_{\text{км}} / (Q_{\text{НУ}}^p \cdot \eta_{\text{ес}} \cdot \eta_{\text{ем}})$;

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

1) сирової;

4) котлової;

2) живильної;

5) підживлювальної.

3) мережної;

4. Яке обладнання може входити до складу теплонасосної станції?

1) водогрійний котел;

3) двигун внутрішнього згорання;

2) газова турбіна;

4) конденсатний насос.

5. Вкажіть діапазон температур оптимального підігрівання теплоносія в ТНУ у складі ТНС?

1) 70 – 80 °С;

4) 65 – 75 °С;

2) 50 – 60 °С;

5) 75 – 85 °С;

3) 60 – 70 °С;

6) 55 – 65 °С.

6. Вкажіть температуру підігрівання води в водогрійному котлі ТНС?

1) $T_{\text{ВК}}$;

4) $T_{\text{В}}$;

2) $T_{\text{ТН}}$;

5) $T_{\text{ЗМВ}}$;

3) $T_{\text{К}}$;

6) $T_{\text{ПМВ}}$.

7. Як визначається навантаження водогрійного котла у складі ТНС?

1) пропорційно $(T_{\text{ПМВ}} - T_{\text{ЗМВ}})$;

4) пропорційно $(T_{\text{ТН}} - T_{\text{ЗМВ}})$;

2) пропорційно $(T_{\text{ПМВ}} - T_{\text{ТН}})$;

5) пропорційно $(T_{\text{К}} - T_{\text{ЗМВ}})$;

3) пропорційно $(T_{\text{ЗМВ}} - T_{\text{ТН}})$;

6) пропорційно $(T_{\text{В}} - T_{\text{ЗМВ}})$.

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

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

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

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

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

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

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

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

4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Номер варіанта в задачах 1 – 6 визначається за шифром, який задає викладач.

Задача 1

В парокомпресійній теплонасосній установці з тепловою потужністю випарника Q_B температура випаровування холодоагенту становить t_B . Температура конденсації t_K . Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у конденсаторі складає $\theta = 5$ °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$; а електромеханічний ККД $\eta_{ем} = 0,95$; ККД теплообмінників $\eta_{то} = 0,98$.

Визначити температуру води на виході конденсатора $t_{ТН}$, масову витрату холодоагенту, потужність компресора теплового насоса, теплову потужність конденсатора, коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу та циклу Карно. Навести схему ТН та зображення циклу на lg P-h діаграмі.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Остання цифра шифру	t_B , °С	t_K , °С	Передостання цифра шифру	Q_B , МВт
0	13	80	0	21
1	18	75	1	17
2	13	70	2	14
3	13	65	3	15
4	18	80	4	16
5	23	75	5	18
6	13	70	6	19
7	13	65	7	20
8	18	85	8	17
9	13	80	9	14

Задача 2

У випарник парокомпресійної теплонасосної установки надходить вода з температурою $t'_{\text{в}}$, а виходить з температурою $t''_{\text{в}}$. Теплова потужність випарника складає $Q_{\text{в}}$. Температура навколишнього середовища складає $T_{\text{нс}}$. Температури води на вході та виході з конденсатора складають, відповідно, $t'_{\text{к}}$ і $t''_{\text{к}}$. Холодоагентом є аміак. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}} = 0,75$, а електромеханічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{\text{то}} = 0,98$. Величина недогріву води у випарнику та конденсаторі складає $\theta = 5$ °С.

Визначити масову витрату холодоагенту, потужність компресора, теплову потужність конденсатора, ексергетичну потужність підведеної та відведеної теплоти, ексергетичний ККД теплонасосної установки. Навести схему ТНУ та зображення циклу на lg P-h діаграмі.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Остання цифра шифру	$t''_{\text{в}}$, °С	$t'_{\text{в}}$, °С	$T_{\text{нс}}$, К	Передостання цифра шифру	$Q_{\text{в}}$, МВт	$t'_{\text{к}}$, °С	$t''_{\text{к}}$, °С
0	18	25	273	0	9	50	60
1	23	30	283	1	13	50	65
2	28	35	293	2	17	50	70
3	18	25	293	3	20	50	75
4	23	30	273	4	11	60	80
5	28	35	273	5	7	70	85
6	28	35	283	6	5	70	80
7	23	30	293	7	9	60	75
8	18	25	283	8	12	55	70
9	23	30	288	9	10	65	80

Задача 3

Теплова потужність конденсатора теплонасосної установки становить $Q_{\text{к}}$. Температура конденсації холодоагенту $t_{\text{к}} = 75$ °С. Холодоагентом є аміак. Величина недогріву води у випарнику та конденсаторі складає $\theta = 3$ °С. Відносний внутрішній ККД компресора складає $\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}} = 0,75$, а електромеханічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{\text{то}} = 0,98$. Температура води на вході в конденсатор становить $t'_{\text{к}} = 50$ °С.

Визначити температуру випаровування холодоагенту t_B , масову витрату холодоагенту, потужність компресора, теплову потужність випарника, коефіцієнт перетворення ТНУ та ексергетичний ККД при різних значеннях температур води на вході та виході з випарника. У випарник пароконденсійної ТНУ надходить вода з температурою t'_B , а виходить з температурою t''_B . Температура навколишнього середовища $T_{HC} = 293$ К.

Навести схему ТНУ та зображення циклу на $\lg P$ - h діаграмі. За результатами проведених розрахунків побудувати залежності коефіцієнта перетворення та ексергетичного ККД від різниці температур конденсації та випаровування.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Остання цифра шифру	1		2		3		Передостання цифра шифру	Q_K , МВт
	t'_B , °C	t''_B , °C	t'_B , °C	t''_B , °C	t'_B , °C	t''_B , °C		
0	10	5	15	8	30	23	0	10
1	25	18	30	23	35	28	1	11
2	30	23	25	18	10	5	2	12
3	10	5	15	8	25	18	3	13
4	15	8	10	5	35	28	4	14
5	25	18	35	28	10	5	5	15
6	35	28	10	5	30	23	6	16
7	25	18	35	28	15	8	7	17
8	10	5	25	18	35	28	8	18
9	35	28	10	5	30	23	9	19

Задача 4

Потужність конденсатора теплового насоса складає Q_K . Температура випаровування холодоагенту становить t_B , температура конденсації t_K . Відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$; електромеханічний ККД $\eta_{em} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{TO} = 0,98$. Величину перегріву пари холодоагенту в проміжному охолоднику конденсату прийняти рівною $\theta = 7$ °C.

Визначити масову витрату холодоагенту, потужності випарника та компресора, коефіцієнт перетворення реального теплонасосного циклу та циклу

Карно. Навести схему теплонасосної установки та зображення циклу на lg P-h діаграмі.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Остання цифра шифру	t_B , °C	t_K , °C	Передостання цифра шифру	Холодо-агент	Q_K , МВт
0	13	65	0	R134a	10
1	18	70	1	R600	11
2	23	75	2	R600a	12
3	13	80	3	R134a	13
4	18	65	4	R600	14
5	23	70	5	R600a	15
6	13	75	6	R134a	10
7	18	80	7	R600	11
8	23	65	8	R600a	12
9	13	70	9	R134a	13

Задача 5

Теплова потужність теплонасосної станції $Q_{ТНС}$. Температура прямої мережної води $t_{ПМВ}$, зворотної – $t_{ЗМВ}$. Температури низькотемпературного джерела теплоти: на вході у випарник – t'_B , на виході – t''_B . Величина недогріву у випарнику та конденсаторі $\theta = 5$ °C. Температура конденсації холодоагенту t_K . Температура навколишнього середовища $t_{нс} = 20$ °C. Відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{oi}^{KM} = 0,75$; електромеханічний $\eta_{ем} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{то} = 0,98$. Нижча теплота згорання робочого палива $Q_H^p = 33,7$ МДж/м³. ККД-нетто котельні $\eta_K^H = 0,8$. Компресор ТНУ має електричний привод. ККД електростанції $\eta_{ес} = 0,36$. ККД електричних мереж $\eta_{ел.мер.} = 0,92$.

Визначити потужність компресора, конденсатора, випарника ТНУ, потужність котла, коефіцієнт перетворення ТНУ, витрату умовного палива ТНУ, ТНС; ексергетичну потужність підведеної та відведеної у ТНС теплоти, ексергетичні ККД ТНУ, котельні, ТНС; економію умовного та робочого палива за рахунок використання ТНУ, питомі витрати умовного палива ТНУ, ТНС, котельні; частку теплової потужності ТНУ.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань до задачі 5

Остання цифра шифру	$t_{\text{пмв}},$ °C	$t_{\text{зmv}},$ °C	$t_{\text{к}},$ °C	Передостання цифра шифру	$Q_{\text{тнс}},$ МВт	$t'_{\text{в}},$ °C	$t''_{\text{в}},$ °C	Холодоагент
0	150	65	80	0	20	25	17	R134a
1	100	55	70	1	25	25	17	R717
2	130	65	80	2	45	30	23	R134a
3	150	70	85	3	50	30	23	R717
4	90	50	70	4	30	25	17	R134a
5	130	70	85	5	35	35	38	R717
6	150	60	80	6	40	25	17	R134a
7	100	50	70	7	60	30	23	R717
8	130	60	75	8	55	35	28	R134a
9	150	70	85	9	50	25	17	R717

Задача 6

Теплова потужність теплонасосної станції та теплових споживачів становить $Q_{\text{ТНС}} = Q_{\text{Тс}}$. Температура прямої мережної води $t_{\text{пмв}}$, зворотної – $t_{\text{зmv}}$. Температури низькотемпературного джерела теплоти: на вході у випарник – $t'_{\text{в}}$; на виході – $t''_{\text{в}}$. Величина недогріву у випарнику та конденсаторі $\theta = 5$ °C. Температура конденсації холодоагенту $t_{\text{к}}$. Температура навколишнього середовища $t_{\text{нс}} = 20$ °C. Відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{\text{oi}}^{\text{KM}} = 0,75$; електромеханічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,95$. ККД теплообмінників $\eta_{\text{то}} = 0,98$. Привод компресора ТНУ від ДВЗ на природному газі. Теоретичний об'єм повітря для спалювання 1 м^3 робочого палива $V^{\circ} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Питома витрата умовного палива ДВЗ за паспортними даними $b_{\text{у}} = 0,3322 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год.})$. Температура повітря для спалювання палива у ДВЗ $t_{\text{пов}} = 30$ °C. Коефіцієнт надлишку повітря у ДВЗ $\alpha = 1,05$. Температура відхідних газів після ДВЗ $t_{\text{д}} = 475$ °C. Температура відхідних газів після утилізатора відхідних газів ДВЗ $t''_{\text{ут}} = 140$ °C. Нижча теплота згорання робочого палива $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 33,78 \text{ МДж}/\text{м}^3$. ККД-нетто котельні $\eta_{\text{к}}^{\text{H}} = 0,8$.

Визначити потужність компресора, конденсатора, випарника ТНУ, потужність котла, теплові потужності утилізатора та системи охолодження ДВЗ, коефіцієнт перетворення ТНУ, витрату умовного палива ТНУ, ТНС;

ексергетичну потужність підведеної та відведеної у ТНС теплоти, ексергетичні ККД ТНУ, котельні, ТНС; економію умовного палива за рахунок використання ТНУ, питомі витрати умовного палива ТНУ, ТНС, котельні; частку теплової потужності ТНУ.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Варіанти завдань до задачі 6

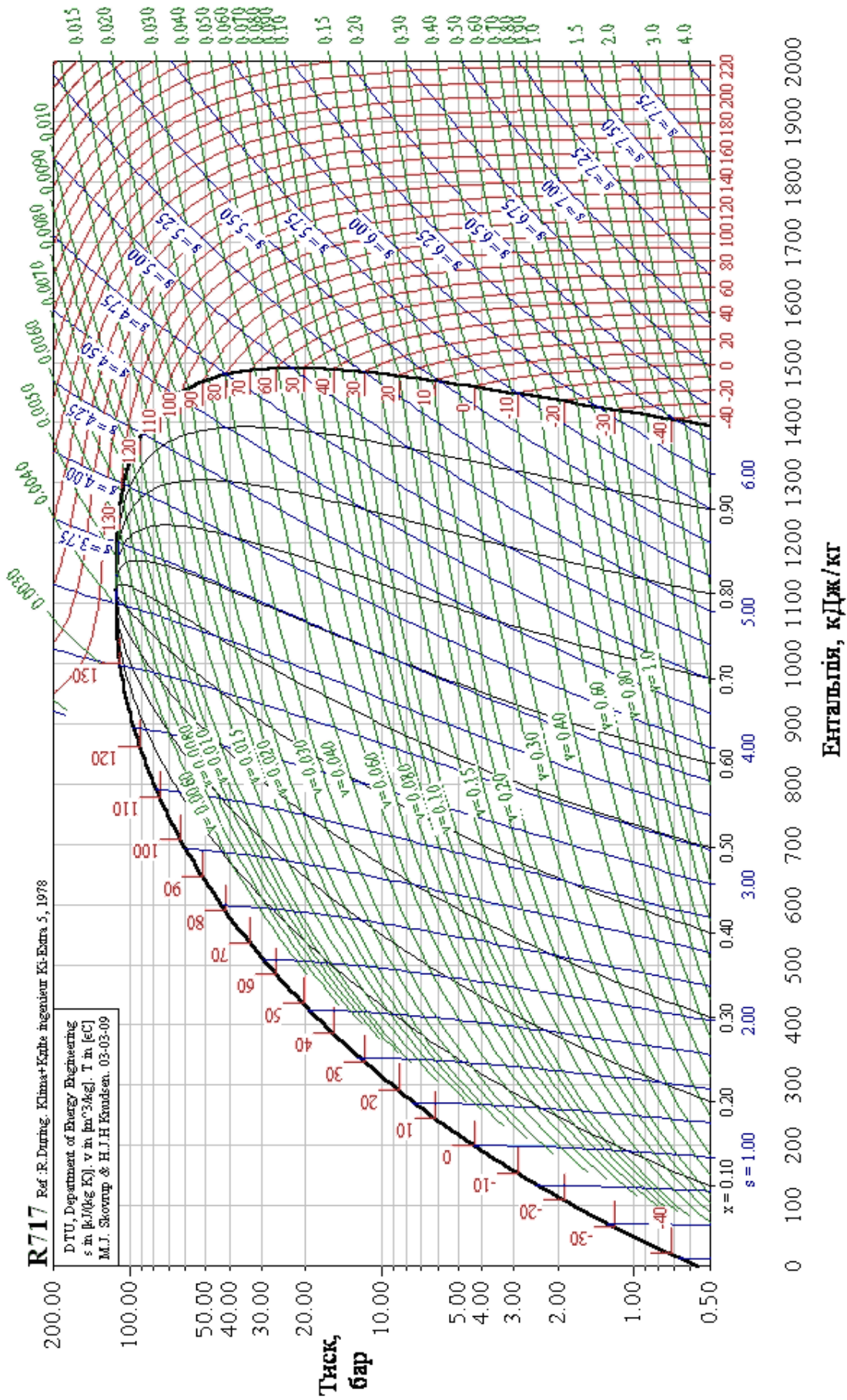
Остання цифра шифру	$t_{\text{пмв}},$ °C	$t_{\text{зmv}},$ °C	$t_{\text{к}},$ °C	Передостання цифра шифру	$Q_{\text{ТНС}},$ МВт	$t'_{\text{в}},$ °C	$t''_{\text{в}},$ °C	Холодоагент
0	130	70	85	0	20	25	17	R134a
1	150	60	80	1	25	25	17	R717
2	100	50	70	2	45	30	23	R134a
3	130	60	75	3	50	30	23	R717
4	150	70	85	4	30	25	17	R134a
5	150	65	80	5	35	35	38	R717
6	100	55	70	6	40	25	17	R134a
7	130	65	80	7	60	30	23	R717
8	150	70	85	8	55	35	28	R134a
9	90	50	70	9	50	25	17	R717

ЛІТЕРАТУРА

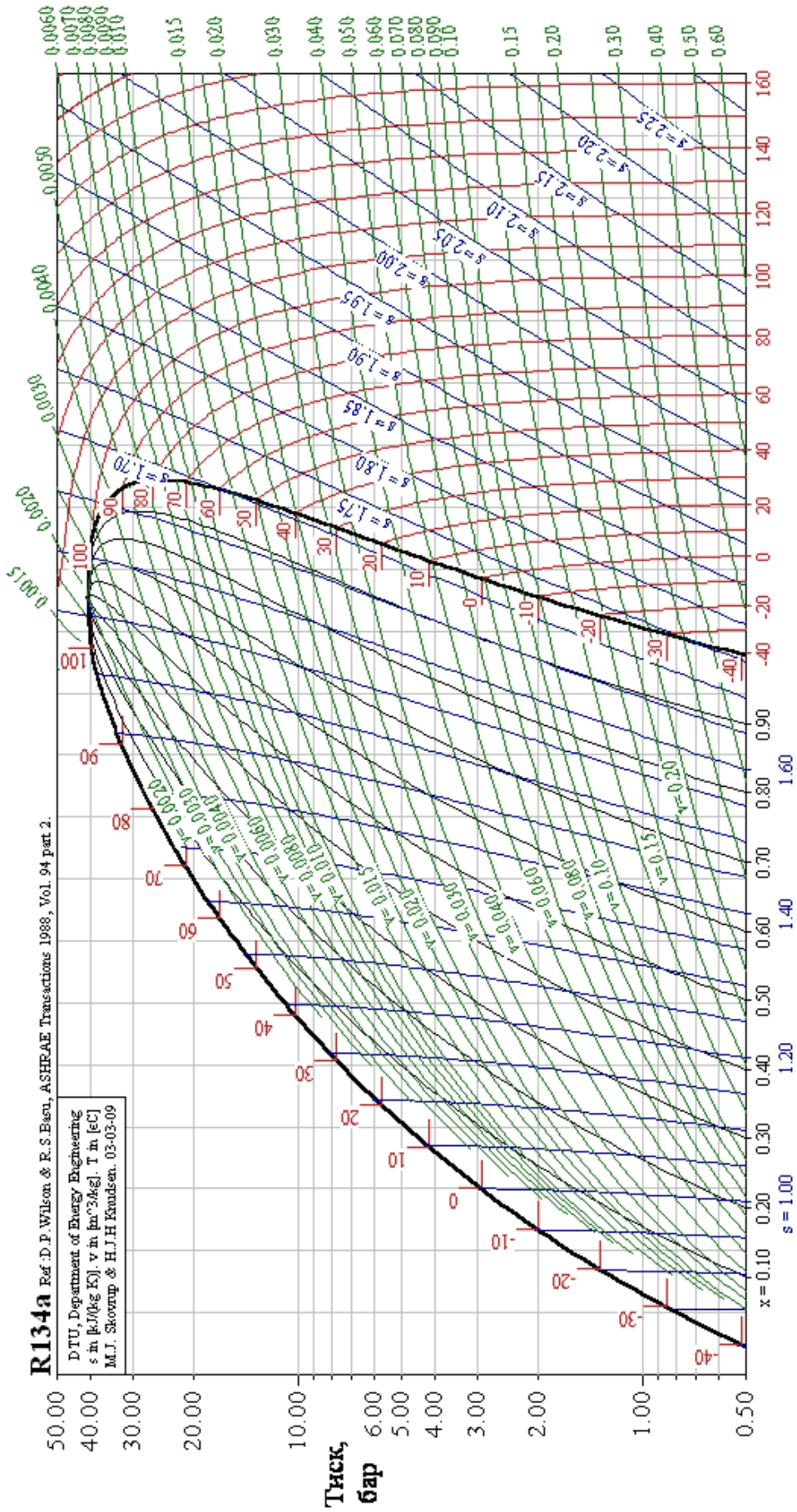
1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Янтовский Е. И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е. И. Янтовский, Ю. В. Пустовалов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 144 с.
3. Термодинамические диаграммы $i\text{-lg}P$ 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.

ДОДАТКИ

Додаток А – Lg P-h діаграма холодоагенту R717

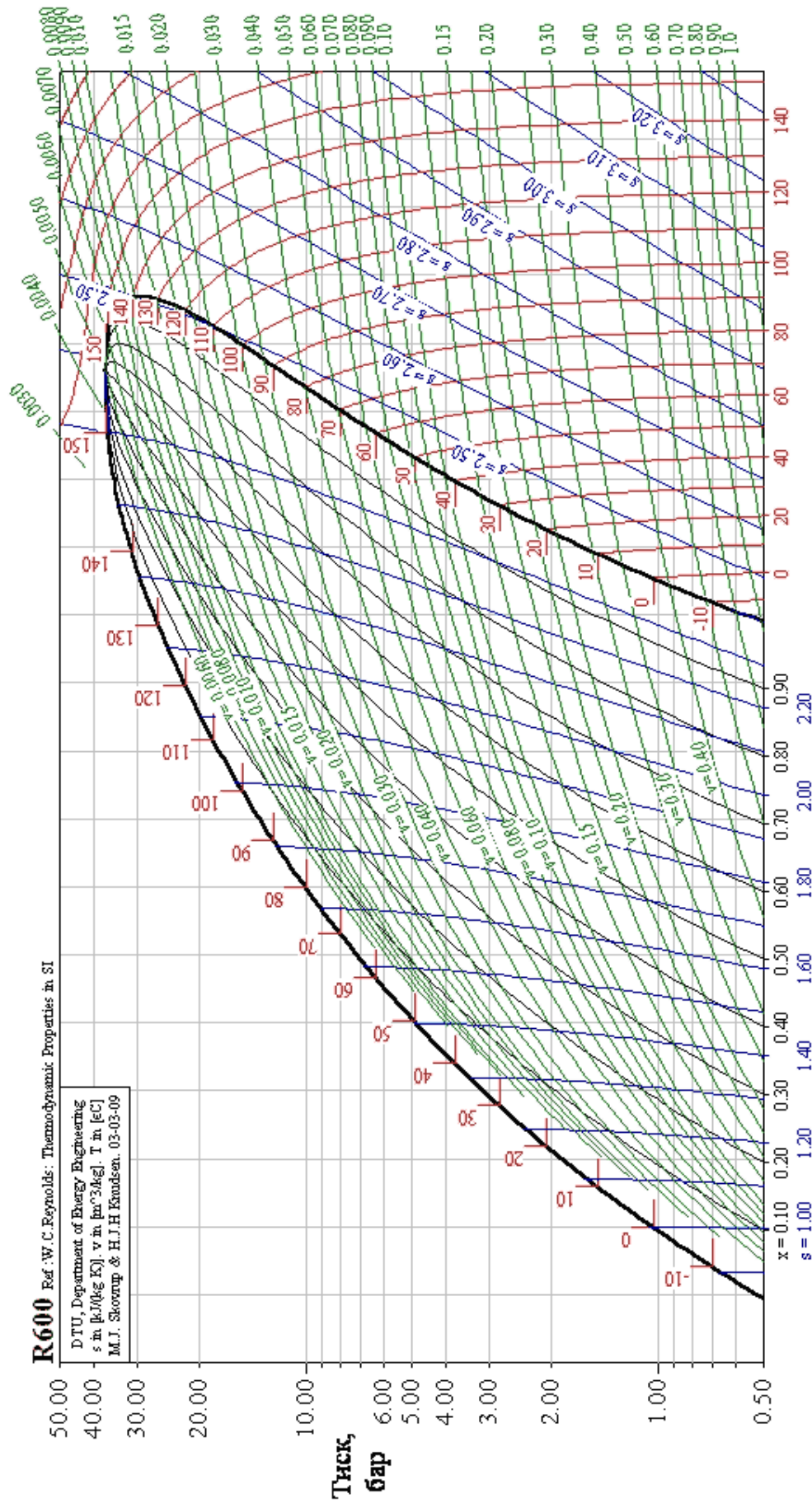


Додажок Б – Lg P-h діаграма холодоагенту R134a

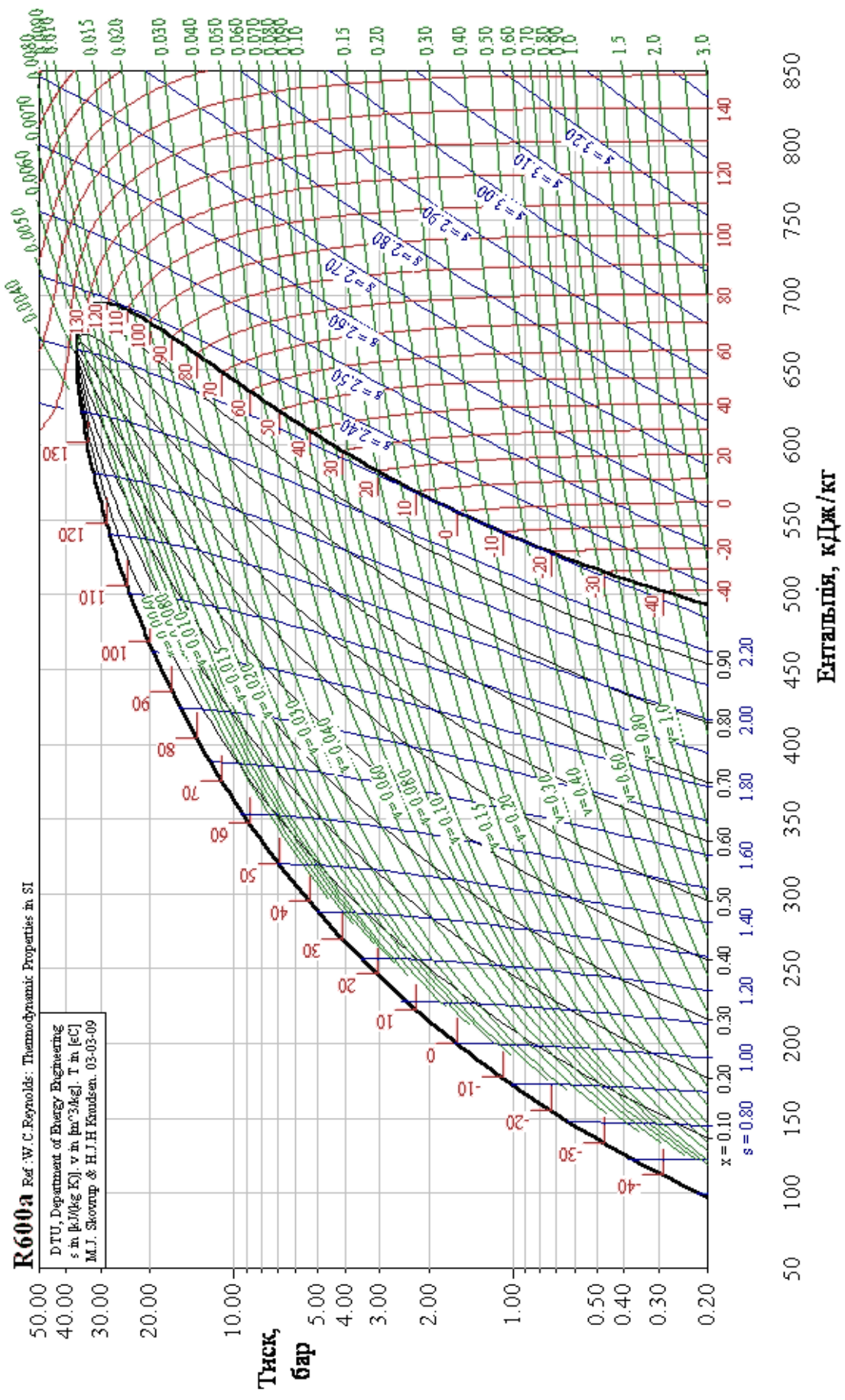


140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560

Додаток В – Lg P-h діаграма холодоагенту R600



Додажок Г – Lg P-h діаграма холодоагенту R600a



Словник найбільш вживаних термінів

Абсолютний	absolute
Абсорбційний	absorptive
Адіабатний	adiabatic
Випарник	evaporator
Газ	gas
Газокомпресійний	gas compression
Джерела низькотемпературної теплоти	low temperature heat sources
Ексергія	exergy
Ексергетичний ККД	exergetic efficiency
Енергія	energy
Ентальпія	enthalpy
ККД	efficiency
Коефіцієнт	coefficient
Коефіцієнт перетворення	coefficient of transformation
Компресійний	compression
Компресор	compressor
Конденсатор	condenser
Конденсація	condensation
Пара	steam
Парокомпресійний	steam compression
Питомий	specific
Рівняння	equation
Робота	work
Система	system
Температура	temperature
Тепловий насос	heat pump
Теплоємність	thermal capacity
Теплонасосна станція	heat pump station
Теплонасосна установка	heat pump installation
Теплота	heat
Установка	installation
Холодоагент	refrigerant
Холодильний	refrigeratory
Холодильний коефіцієнт	refrigeratory coefficient
Холодильна машина	refrigeratory machine
Цикл	cycle
Цикл Карно	Carnot cycle

Навчальне видання

Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів
з дисципліни «Холодильна техніка
та технологія». Частина 2 «Теплові насоси»
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» всіх форм навчання

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Укладач Остапенко Ольга Павлівна

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку 23.05.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 7,32.
Наклад 40 (1-й запуск 1-21) пр. Зам. № 2017-153.

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, 59-81-59,
press.vntu.edu.ua,
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.