

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГРУДКА БОГДАН ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 621.57:536.7

**ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИКОРИСТАЛЬНИХ
ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН В СИСТЕМАХ ТРИГЕНЕРАЦІЇ**

05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник –

доктор технічних наук, доцент,
Морозюк Лариса Іванівна,
Одеська національна академія харчових технологій, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського, МОН України, професор кафедри кріогенної техніки

Офіційні опоненти –

доктор технічних наук, професор,
Петраш Віталій Дем'янович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, МОН України, завідувач кафедри опалення, вентиляції та охорони повітряного басейну

доктор технічних наук, професор,
Денисова Алла Євсїївна
Одеський національний політехнічний університет, МОН України, професор кафедри теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій, директор навчально-наукового українсько-польського інституту ОНПУ

Захист дисертації відбудеться «04» червня 2018 р. о 11 годині ⁰⁰ хвилин в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Автореферат розіслано «25» квітня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д41.088.03
доктор технічних наук, професор



Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

З огляду на термодинаміку, холодильні машини завжди пов'язані з тепловими машинами. Якщо тепла та холодильна машина мають єдину робочу речовину, то здійснюється комплексний термодинамічний цикл, який складається з простих прямого і зворотного циклів. Такі машини відносяться до типу тепло-використальних та поділяються між собою на групи: сорбційні, ежекторні і компресорні.

Перспективним шляхом розвитку і вдосконалення сучасних тепло-використальних машин є їх об'єднання з енергетичною системою когенерації (отримання електроенергії і тепла). Виникає тригенерація – одночасне отримання трьох корисних ефектів: електроенергії, тепла і холоду за використанням єдиного виду первинної енергії – тепла.

З існуючих систем тригенерації енергетичних установок відокремлюються системи малої енергетики. Вони найбільш затребувані, але мають надто малу технічну інформацію відносно розвитку.

Мала енергетика вирішує проблеми населених пунктів, віддалених від центральних енергетичних систем, та незалежних малих підприємств, зокрема, сільськогосподарських.

В організації тригенерації головним і важливим є наявність споживачів тепла і холоду з відповідними співвідношеннями продуктивностей та температурних режимів.

Враховуючи сказане, актуальним є термодинамічний аналіз різних типів тепловикористальних машин в режимах тригенерації, який надає можливість попередньо визначити не тільки енергетичну ефективність та екологічну безпеку, але й створити уявлення про низку інженерних факторів, таких як маса, габарити, якість конструктивних матеріалів та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Закону України №75/94-ВР «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р., Постановою Кабінету Міністрів України №2274-11 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року» від 22.02.2001 р., Закону Верховної Ради України №2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 р., Закону України №2509-IV «Про комбіноване використання теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного потенціалу» від 05.04.2005 р.

Мета та задачі дослідження.

Метою дослідження є термодинамічний аналіз тепловикористальних холодильних машин в системах тригенерації. **Задачі:**

– Провести аналіз стану проблеми розвитку тепловикористальних машин, систем тригенерації, термодинамічний аналіз дійсних зворотних циклів енергоперетворювальних систем;

– Розробити схемно-циклові рішення систем тригенерації малої енергетики з позицій енергозбереження та екологічної безпеки;

– Провести термодинамічний аналіз процесів в абсорбційно-резорбційній холодильній машині з $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ робочою речовиною в режимах тригенерації;

– Провести термодинамічний аналіз процесів компресорної холодильної машини з CO_2 робочою речовиною в режимах тригенерації.

Об'єктом дослідження є компресорні та абсорбційно-резорбційні тепло-використальні холодильні машини в системі тригенерації.

Предметом дослідження є термодинамічні процеси в компресорних та абсорбційно-резорбційних тепловикористальних холодильних машинах в режимах системи тригенерації.

Методи дослідження: термодинамічний аналіз та числове моделювання термодинамічних процесів в компресорних та абсорбційно-резорбційних тепловикористальних холодильних машинах в режимах системи тригенерації. Основою математичного моделювання є рівняння класичної термодинаміки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

– В результаті аналітичного дослідження запропоновано схемно-циклові рішення систем тригенерації малої енергетики з розв'язанням задач енергозбереження та екологічної безпеки;

– Доведено, що максимальну енергетичну ефективність компресорної тепловикористальної холодильної машини забезпечено за умови одночасних процесів перехресної регенерації тепла в прямому і зворотному циклах та регенерації тепла у зворотному циклі;

– Вперше запропоновано схемно-циклові рішення компресорної тепло-використальної холодильної машини з CO_2 : низькотемпературної та з функцією системи тригенерації;

– Вперше використано ексергетичний метод термодинамічного аналізу для оцінки працездатності абсорбційно-резорбційної холодильної машини з $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій визначаються: коректною постановкою завдання і його вирішення з побудовою математичної моделі на класичних рівняннях термодинаміки. Отримані значення коефіцієнтів енергетичної ефективності компресорних і абсорбційно-резорбційних тепловикористальних холодильних машин є достовірними, оскільки співпадають з такими у дійсних абсорбційних машин, що працюють за аналогічними температурними режимами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у такому:

– Розроблене схемно-циклове рішення абсорбційно-резорбційної холодильної машини рекомендується для практичної реалізації в системі малої енергетики з використанням устаткування, яке випускається світовими фірмами для роботи з $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ розчином;

– Розроблені схемно-циклові рішення компресорної холодильної машини з CO_2 з функцією системи тригенерації можна рекомендувати до реалізації як самостійної системи, так і в складі енергетичних установок з використанням устаткування, яке випускається світовими фірмами для роботи з CO_2 ;

– Ексергетичний аналіз компонентів абсорбційно-резорбційної тепло-використальної холодильної машини може бути використано для дослідження будь-яких абсорбційних систем, незалежно від роду робочої суміші та схемно-циклових рішень;

– Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для підготовки студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» галузі знань 14 «Електрична інженерія» в курсах лекцій «Теоретичні основи холодильної техніки», «Сучасні тепловикористальні холодильні машини» та «Термодинамічний аналіз циклів холодильних машин та теплових насосів», в дипломному проектуванні та під час виконання магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача підтверджується науковими публікаціями, в яких відображаються основні ідеї і положення теоретичних розробок. Особисто автором проведено аналіз стану проблеми за результатами огляду літературних джерел. Автором запропоновано нові схемно-циклові рішення машини і системи тригенерації на її базі, виконано варіантні розрахунки енергетичної (ексергетичної) ефективності та проведено аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів роботи. Дисертацію обговорено на засіданнях кафедри кріогенної техніки ОНАХТ. Результати дисертаційної роботи доповідались на Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (м. Одеса, Україна, 2014, 2015, 2016, 2017), 10-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, Україна, 2015), 1st European Seminar on Supercritical CO₂ (sCO₂) Power Systems (Vienna, Austria, 2016), 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Казахстан – Холод 2017» (м. Алмати, Казахстан, 2017), 7-ому Міжнародному семінарі «NH₃&CO₂-2017» (м. Одеса, Україна, 2017).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 14 публікаціях, з яких 5 статей опубліковано у спеціалізованих наукових журналах, затверджених ДАК МОН України, 1 стаття – у науковому журналі, що індексується у наукометричній базі Scopus, 2 статті – у міжнародних наукових виданнях та 6 тез доповідей на семінарах та конференціях.

Об'єм і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 135 сторінок. Дисертаційна робота містить 80 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел із 98 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, які впливають із сучасного стану проблеми, викладено наукові положення, новизну, основні результати та визначено їх практичну цінність, наведено відомості про апробацію результатів роботи і публікації, вказано особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** «Аналіз стану проблеми» розглянуто стан проблеми сучасного розвитку техніки, пов'язаного з необхідністю розробки та оновлення будь-яких технічних систем і устаткування. Інтенсивне оновлення парку малих енергетичних установок (продуктивністю до 1 МВт) в сучасних умовах стало наслідком появи міжнародних розпорядчих документів про обов'язкове здійснення природоохоронних заходів в контексті раціонального використання всіх природних ресурсів, включаючи паливно-енергетичні.

В результаті, розвиток малих енергетичних установок, в поєднанні з екологічно чистими енергозберігаючими технологіями, пішов по шляху освоєння нових схемно-циклових рішень. Змін зазнали уявлення про робочі речовини, раціональні конструкції, параметри і характеристики обладнання, а разом з цим методи і прийоми проектування.

На підставі аналізу взаємозв'язків в класі енергоперетворювальних систем (рис.1) встановлено, що найпростіший і водночас перспективний шлях використання первинної енергії (палива) для вироблення корисних ефектів (електроенергії, тепла та холоду) ґрунтується на концепції тригенерації.

Об'єднання в єдиний комплекс системи когенерації та тепловикористальної холодильної машини з виробництвом трьох корисних ефектів здатне дати максимальний ефект економії природних ресурсів. Зв'язок встановлено з огляду робочих речовин, які здійснюють усі процеси створення систем тригенерації.

Проаналізовано три позиції: створення тепловикористальних холодильних машин, створення систем тригенерації та методів їх проектування з використанням

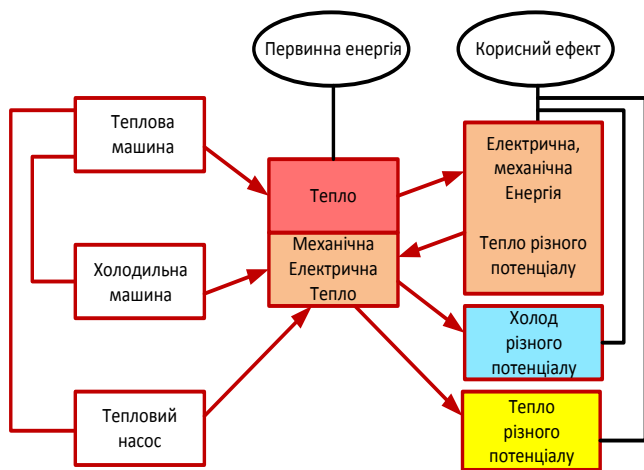


Рис.1. Взаємозв'язок енергоперетворювальних машин

термодинамічного аналізу дійсних циклів. Виконано критичний аналіз існуючих типів тепловикористальних холодильних машин за компенсуючими процесами (абсорбційних, компресорних, ежекторних), робочими речовинами та температурними рівнями джерел тепла. Для дослідження обрано природні робочі речовини $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ та CO_2 , наведено огляд холодильних машин різного призначення з цими робочими речовинами. Проведено огляд робіт, присвячених існуючим системам когенерації та тригенерації. На підставі літературних джерел подано огляд наявних методів

термодинамічного аналізу та критично оцінено їх використання у процесі сучасного проектування холодильних машин, зокрема тепловикористальних. У результаті аналізу отриманої інформації сформовано основні задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі «Нові технічні рішення тригенерації в малій енергетиці» представлено нові технічні рішення тригенерації в малій енергетиці. Тригенерація забезпечує використання генеруючого пристрою протягом всього року, тим самим не знижуючи високого ККД енергетичної установки. У літній період, коли потреба у виробництві тепла падає, збільшується потреба в холоді.

У розділі розглянуто різні схеми тригенерації та розподіли енергетичних потоків в залежності від потреб виробництва корисних ефектів.

В системі (рис.2) головною є енергетична установка (ЕУ) з виробництвом електроенергії (ЕЕ). Первинною енергією (ПЕ) є паливо (тверде, рідке, газоподібне, біогаз та ін.). Система має два обов'язкових скидання в навколишнє середовище: в енергетичній установці і холодильній (ОС), і внутрішні необоротні втрати (Д) в системі (деструкція енергії).

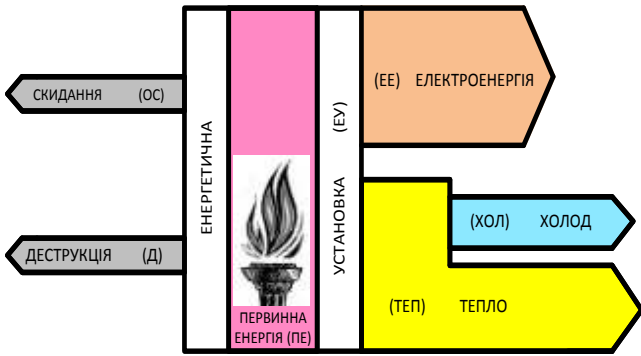


Рис.2. Енергетичні потоки системи тригенерації

Високотемпературне утилізоване тепло використовується для отримання двох термічних ефектів – тепла (ТЕП) і холоду (ХОЛ). Для отримання холоду витрачають частину виробленого тепла, а систему комплектують тепловикористальною холодильною машиною.

У загальному випадку, енергетичний баланс системи тригенерації представлено математичним виразом:

$$Q_{ne} = Q_{ee} + (Q_{men} / COP_{men}) + (Q_{хол} / COP_{хол}) + Q_{oc} + Q_d, \quad (1)$$

де Q_{ne} – первинна енергія; Q_{ee} – тепло, призначене для отримання електроенергії; Q_{men} – тепло, призначене для опалення; $Q_{хол}$ – тепло, призначене для отримання холоду; Q_{oc} – обов’язкове теплове скидання в навколишнє середовище; Q_d – деструкція енергії в системі; COP_{men} – коефіцієнт енергетичної ефективності теплового насоса (виробництво тепла); $COP_{хол}$ – коефіцієнт енергетичної ефективності холодильної машини (виробництво холоду).

Для визначення величин всіх доданків у рів.(1) враховується широке розмаїття енергетичних установок (газопоршневі, газотурбінні, паливні елементи, дизель-генератори, сонячні батареї та ін.). Сумарна продуктивність корисних ефектів системи тригенерації повністю визначається термодинамічною досконалістю енергетичної установки. Співвідношення виробництва тепла Q_{men} і холоду $Q_{хол}$ залежить від потреб промислового виробництва, а для сільського господарства його величина безпосередньо визначається кліматичними умовами, в яких знаходиться конкретне виробництво, і родом його виробничої діяльності. При цьому важливий вплив надають сезонні і добові коливання температури зовнішнього повітря. Отже, другий та третій доданки у рів.(1) змінюються відповідно до потреб виробництва при збереженні загального енергетичного балансу. Далі проаналізовано декілька схем тригенерації з NH_3-H_2O та CO_2 робочими речовинами для отримання холоду, які можна вважати новими технічними рішеннями на підставі огляду літературних джерел у першому розділі роботи. Конструктивну схему тригенерації з абсорбційно-

резорбційною холодильною машиною зображено на рис.3.

Вона складається з головної енергетичної установки з котлом-утилізатором і холодильною машиною.

Газопоршневий агрегат працює на природному газі і виробляє електроенергію.

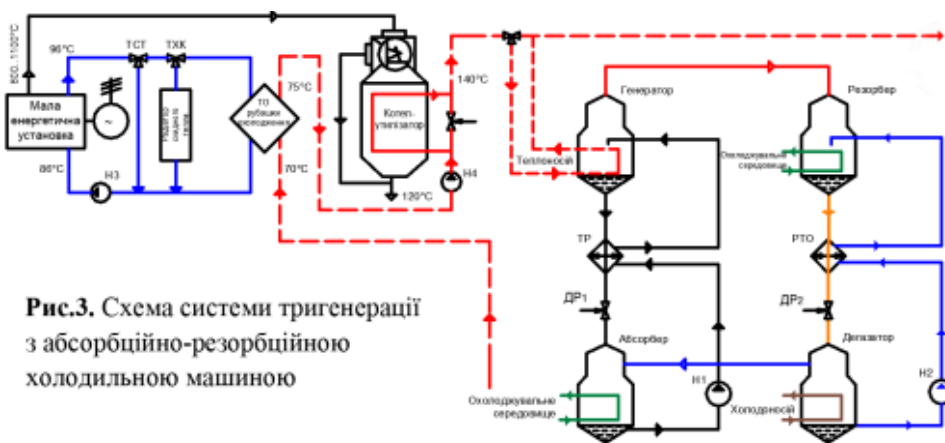


Рис.3. Схема системи тригенерації з абсорбційно-резорбційною холодильною машиною

Обов'язковим скиданням є викидні гази при температурі близько 800...1100°C. В котлі-утилізаторі здійснюється отримання гарячої води з температурою на рівні 140°C, забезпечуючи потреби споживача в опаленні.

Частина гарячої води з котла-утилізатора відбирається для роботи тепло-використальної холодильної машини. Системі відповідає розподіл енергетичних потоків на рис.2.

Умовами для роботи абсорбційної машини з NH₃-H₂O в складі системи тригенерації визначено: широкий інтервал температур гріючого джерела, широкий інтервал температур виробництва холоду, різне поєднання температурних режимів роботи споживачів тепла і холоду, можливість значного підігріву охолоджувального середовища в процесах відведення тепла в елементах холодильної машини.

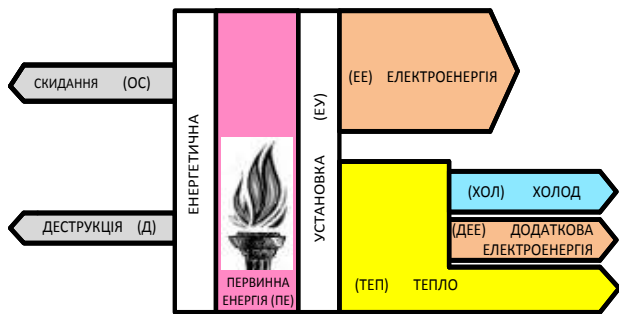


Рис.4. Енергетичні потоки системи тригенерації з отриманням додаткової електроенергії

Розподіл енергетичних потоків системи тригенерації може ускладнюватися в залежності від потреб у виробництві холоду. На рис.4 зображено енергетичні потоки системи, в якій частка утилізованого тепла трансформується в два корисних ефекти – холод та додаткову електроенергію, на рис.5 – конструктивна схема такого технічного рішення тригенерації з використанням абсорбційної машини з NH₃-H₂O.

Нова пропозиція вміщує таке. Гарячі викидні гази енергетичної установки з температурами 800...1100 °C розподіляються на два потоки. Один потік прямує до котла-утилізатора, де виконує пряму функцію – виробництво гарячої води з температурою 140 °C. Вода йде у генератор абсорбційної машини, забезпечуючи виробництво холоду.

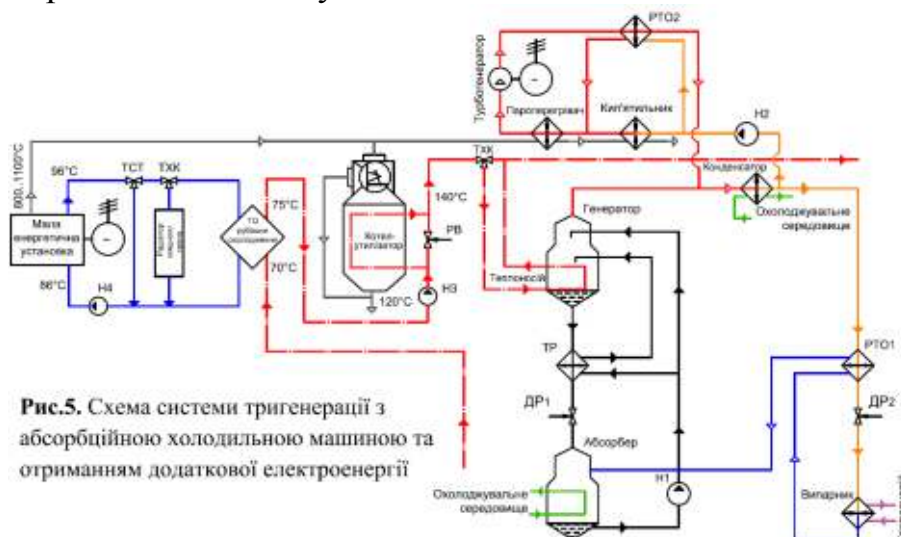


Рис.5. Схема системи тригенерації з абсорбційною холодильною машиною та отриманням додаткової електроенергії

Для отримання додаткової електроенергії (ДДЕ) в схемі передбачено самостійні контури циркуляції: другого потоку викидних газів високої температури і частини потоку холодоагенту, відібраної після конденсатора абсорбційної машини. Внаслідок теплової взаємодії цих потоків здійснюється цикл Ренкі-

на з паровою турбіною. Енергетичний баланс системи записано у вигляді:

$$Q_{ne} = Q_{ee} + Q_{ee}^* + (Q_{men} / COP_{men}) + (Q_{хол} / COP_{хол}) + Q_{oc} + Q_d \quad (2)$$

Додаткову електроенергію може бути використано для виробництва холоду на температурному рівні, відмінному від головної машини з використанням робочих

речовин, відмінних від головної машини: природних або синтезованих, чистих або сумішей.

Обов'язковими умовами працездатності системи є баланс – додаткова електроенергія Q_{ee}^* більша або дорівнює необхідній для роботи холодильної машини ($Q_{хол} / COP_{хол}$).

Систему тригенерації з компресорною холодильною машиною представлено циклом Чистякова- Плотнікова з CO_2 робочою речовиною та агрегатом «турбіна-компресор» (рис.6). Загальний цикл холодильної машини реалізується в двох областях: в надкритичній – прямий, в двофазній – зворотний. Робочі процеси в газовому нагрівачі та газовому охолоджувачі машини відбуваються за змінними температурами як робочої речовини, так і двох джерел тепла – високотемпературного та середньотемпературного.

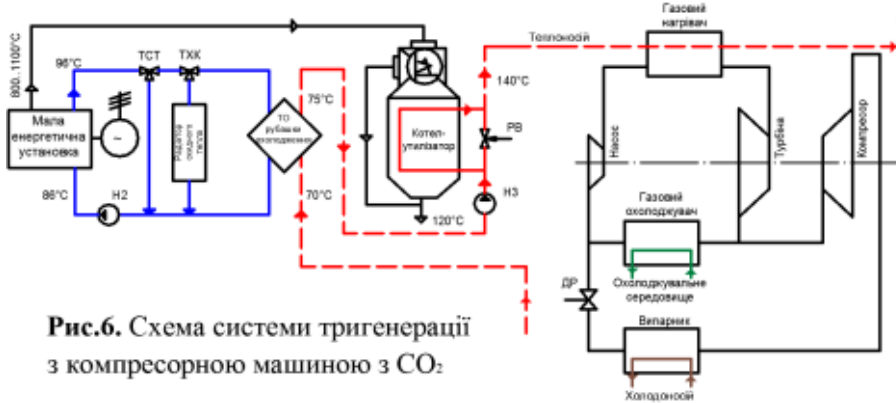


Рис.6. Схема системи тригенерації з компресорною машиною з CO_2

Розглянута система розширює можливості утилізації обов'язкових скидань енергетичної установки. Температурний діапазон роботи котла-утилізатора до 300...500 °С, темпера-

турний інтервал отриманого тепла до 200 °С, температурний інтервал отриманого холоду до -30 °С з відповідним підвищенням енергетичної ефективності та екологічної безпеки системи.

Розглянуті системи мають головну енергетичну установку ЕУ зі своєю робочою речовиною, яка відрізняється від робочої речовини холодильної машини.

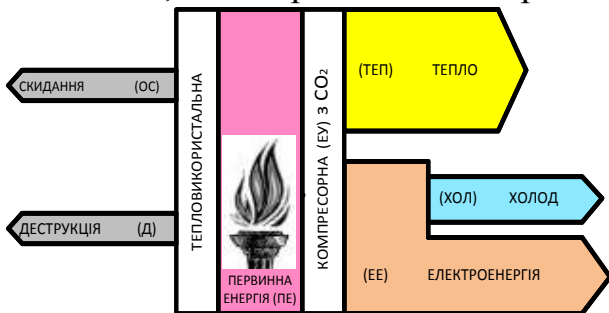


Рис.7. Енергетичні потоки системи тригенерації з єдиною робочою речовиною

Для підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки системи тригенерації запропоновано схему, в якій енергетична установка та холодильна машина матимуть єдину робочу речовину – CO_2 . У цьому випадку тепловикористальна компресорна холодильна машина виконує функції системи тригенерації. Схему енергетичних потоків системи зображено на рис.7, конструк-

тивну – на рис.8. В газовому нагрівачі генерується потік CO_2 високого тиску та температури за теплообміном з самостійним гріючим джерелом. Надалі здійснюється розширення в турбіні з отриманням електроенергії. Електрична енергія розподіляється між стороннім споживачем, компресором, насосом за умови збереження енергетичного балансу системи (рів.3):

$$Q_{ne} = Q_{ee} + Q_{ee}^* + Q_{мен} + (Q_{хол} / COP_{хол}) + Q_{oc} + Q_d \quad (3)$$

Конструкція компресора для машини не оговорюється. В машині реалізується будь-яка продуктивність з широким інтервалом температур отриманого холоду. Можливе регулювання холодопродуктивності в широкому діапазоні від 100 % до

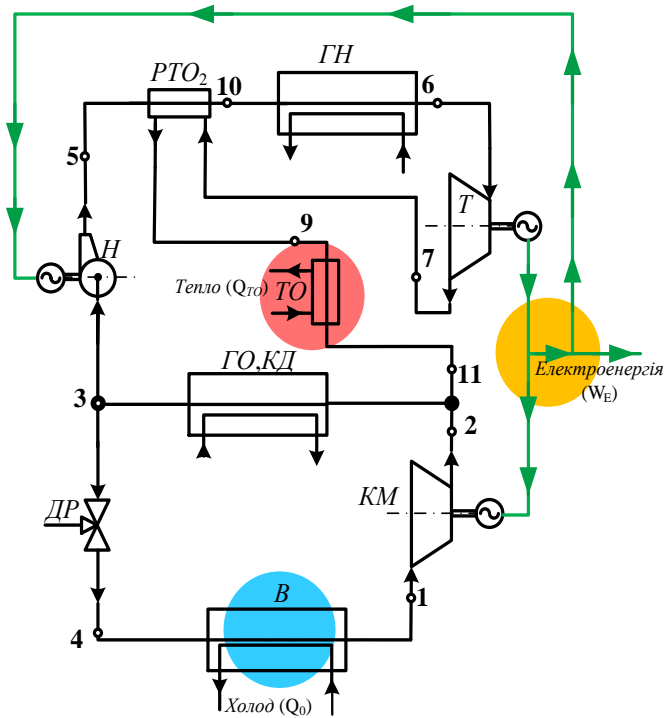


Рис.8. Схема системи тригенерації з єдиною робочою речовиною

0%. Виявлені особливості роблять схемне рішення універсальним і дозволяють машині працювати цілорічно, незважаючи на сезонність отримання холоду. Автономність системи тригенерації забезпечує третій корисний ефект – виробництво тепла, як самостійний, з огляду на потрібну продуктивність та температурний рівень.

Можливість практичної реалізації тригенерації в малій енергетичній установці ілюструють розрахунки енергетичних потоків на прикладі окремого фермерського сільськогосподарського виробництва.

Невелике фермерське господарство включає житловий будинок загальним об'ємом 600 м³, господарсько-побутове приміщення об'ємом 1000 м³, теплицю об'ємом 120 м³, три самостійні охоло-

джувані приміщення для зберігання продуктів сільськогосподарського виробництва загальним об'ємом 750 м³. Отже, господарство має одночасну і постійну потребу в певних обсягах електричної енергії, холоду та теплової енергії.

Утилізоване тепло $Q_{ут}$ згідно з енергетичним балансом становить:

$$Q_{ут} = Q_{оп} + Q_{мк} + Q_{те} + Q_{тн} + Q_{хол} + Q_{сб} \quad (4)$$

де $Q_{оп}$ – опалення житлових, виробничих і підсобних приміщень в холодну пору року; $Q_{мк}$ – кондиціювання або підтримання мікроклімату в житлових і виробничих приміщеннях в теплу пору року; $Q_{те}$ – цілорічне отримання теплої води для побутових і виробничих потреб; $Q_{тн}$ – сезонне опалення теплиці; $Q_{хол}$ – сезонне охолодження та низькотемпературне зберігання швидкопсувних продуктів рослинного і тваринного походження; $Q_{сб}$ – обов'язкові теплові скидання в навколишнє середовище.

Співвідношення продуктивностей корисних ефектів і температурних режимів виробництва тепла і холоду (рис.9) повністю залежать від потреб певного виробника, безпосередньо визначаються коливаннями температури зовнішнього повітря і енергетичною ефективністю установок, які виробляють кожен ефект.

Основні кліматичні і технічні дані, прийняті у якості розрахункових: 1) температури навколишнього повітря у різні пори року: взимку $t_{нз} = -10$ °С; влітку $t_{нл} = 28,6$ °С; навесні та восени $t_{нео} = 5$ °С; 2) температури у споживача: в будівлях $t_g = 20$ °С; в охолоджуваних об'єктах $t_k = 4$ °С; в теплиці $t_{тн} = 15$ °С; гаряча вода $t_{те} = 70$ °С; водопровідна вода: $t_{ев} = 20$ °С; 3) дані енергетичної установки: викидні гази $t_{оз} = 800$ °С; теплоносій на вході $t_{ex} = 80$ °С та виході $t_{вых} = 140$ °С.

Розрахунки потреб тепла та холоду фермерського господарства протягом року здійснено за рекомендаціями довідкової технічної інформації та нормативних

документів СНП. Результати розрахунків наведено в графічній формі на рис.10.

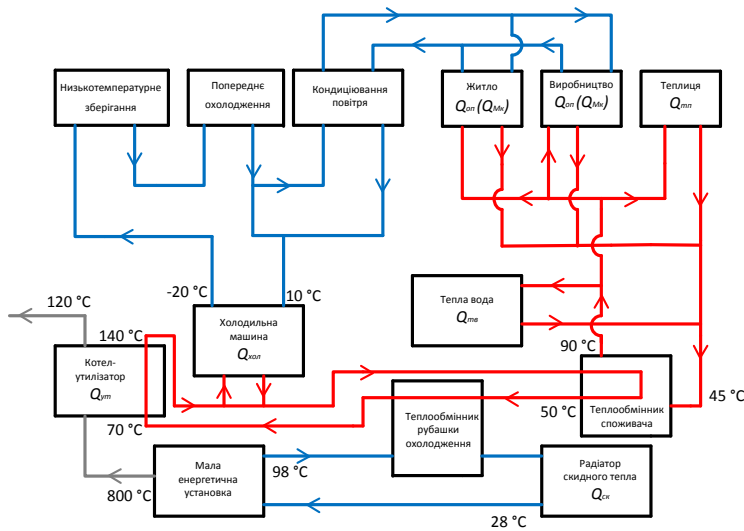


Рис.9. Схема енергетичних потоків в системі тригенерації

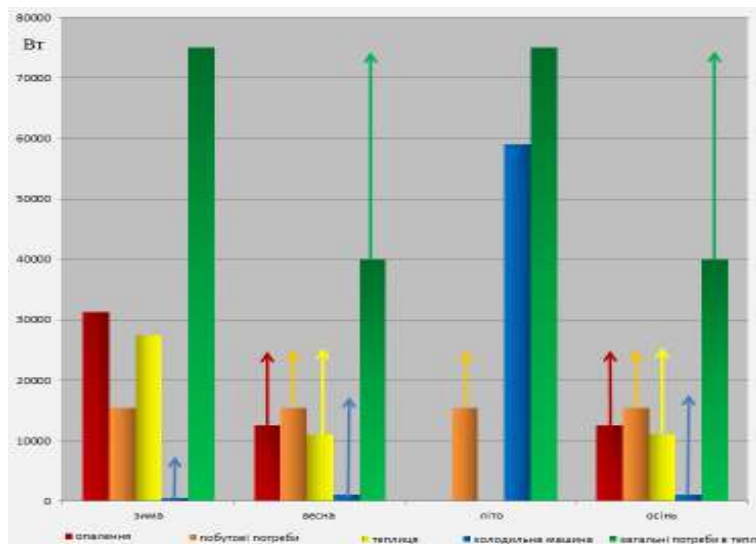


Рис.10. Сезонні потреби тепла для господарства

ційною машинами визначила переваги першої в складі системи тригенерації.

Всі чотири процеси фазових перетворень робочої речовини в АРХМ (рис.11) відбуваються за змінними температурами виробництва холоду в дегазаторі та віддавання тепла охолоджувальному середовищу в резорбері резорбційного ступеня, в генераторі і абсорбері термохімічного компресора.

Ця особливість впливає на термодинамічну досконалість машини і визначає галузь раціонального застосування, якою, зокрема, є розглянута система. Ще одна перевага резорбційної машини – тиск в генераторі та резорбері, що є незалежною величиною. Від нього залежать: теплові навантаження на апарати, енергетична ефективність та експлуатаційна надійність.

Термодинамічну досконалість АРХМ в режимі тригенерації встановлено енергетичними (COP) та ексергетичними (η_e) характеристиками циклу.

Оцінку енергетичної ефективності машини здійснено за розв'язанням окремих задач термодинамічного аналізу з подальшим їх об'єднанням.

Для розрахунків обрано вихідні параметри, які відповідають дійсним

Відповідно до розрахунків потреба тепла в зимовий період становить 75 кВт, що є максимальною тепловою продуктивністю енергетичної установки.

У весняно-осінній період потреба тепла становить 40 кВт. Резерв тепла у кількості 35 кВт використовується за температурами навколишнього повітря, відмінними від розрахункових: для опалення і теплиці (при зниженні температури), для холодопостачання приміщень (при підвищенні температури). У літній період потреба тепла становить 40 кВт, резерв, у кількості 35 кВт, спрямовано на кондиціонування повітря. Отримані результати свідчать про перспективність практичної реалізації тригенерації в малій енергетиці.

У третьому розділі «Термодинамічний аналіз процесів в абсорбційно-резорбційних машинах (АРХМ)» здійснено термодинамічний аналіз процесів абсорбційно-резорбційної машини. Принципова відмінність між резорбційною та звичайною абсорб-

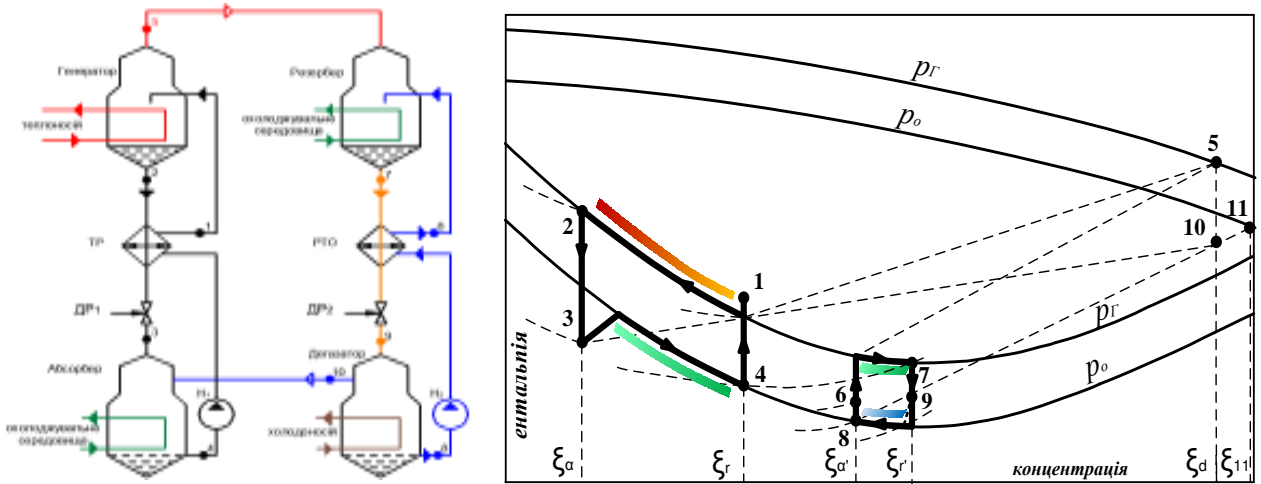


Рис.11. Схема та цикл абсорбційно-резорбційної холодильної машини

температурним режимам систем тригенерації для фермерського господарства: температура гріючого джерела (теплоносія) $T_{ep} = 70...140^{\circ}\text{C}$; температура охолоджувального середовища $T_{сер} = 20...40^{\circ}\text{C}$; температура споживача холоду (холодоносія) $T_{хол} = 0...15^{\circ}\text{C}$; робочий тиск в генераторі та резорбері $p_{г} = 0,5...1 \text{ МПа}$.

Параметри у вузлових точках 2,3,4,6,8 циклу та питомі характеристики апаратів визначено з використанням методичних рекомендацій до розрахунків абсорбційних машин.

Розв'язано чотири задачі визначення COP АРХМ за умови:

Задача 1: $T_{ep} = var; T_{хол} = const; T_{сер} = const; p_{г} = const;$

Задача 2: $T_{хол} = var; T_{ep} = const; T_{сер} = const; p_{г} = const;$

Задача 3: $T_{сер} = var; T_{хол} = const; T_{ep} = const; p_{г} = const;$

Задача 4: $p_{г} = var; T_{хол} = const; T_{ep} = const; T_{сер} = const.$

Розв'язання задач демонструє рис. 12, а результати представлено в графічній

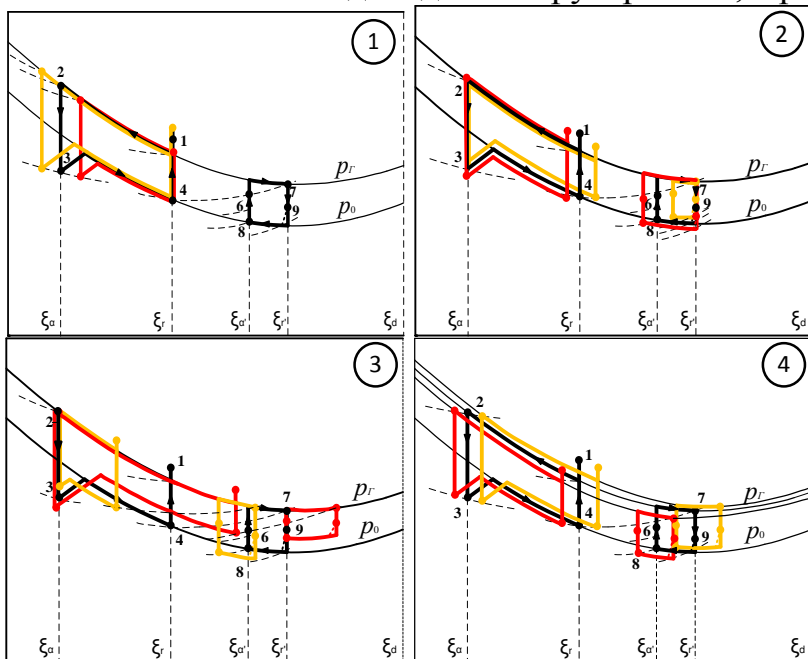


Рис. 12. Розв'язання задач

формі на рис. 13 в єдиній системі координат:

$COP = f(T_{ep}, T_{хол}, T_{сер}, p_{г})$. За-

гальний діапазон значень енергетичної ефективності (COP) абсорбційно-резорбційної холодильної машини, що працює в температурному режимі системи тригенерації малої енергетики, становить $0.25...0.65$, що є класичним показником для абсорбційної техніки. Основні висновки щодо ексергетичної ефективності машини зроблено на підставі аналізу величини втрати ексергії (ΔE) в кожному

компоненті АРХМ і ексергетичного ККД системи (η_e) в цілому. Схему простої АРХМ для ексергетичного аналізу представлено на рис. 14, цикл – на рис. 15.

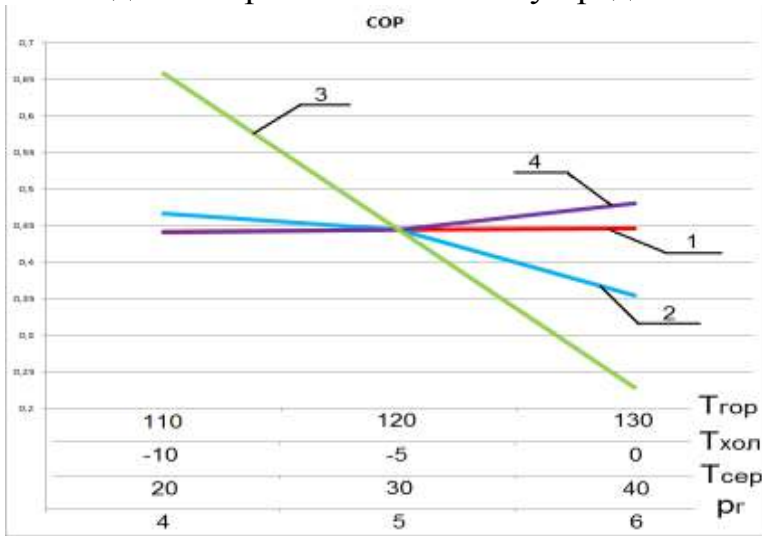


Рис.13. $COP = f(T_{cp}, T_{хол}, T_{сер}, p_{г})$

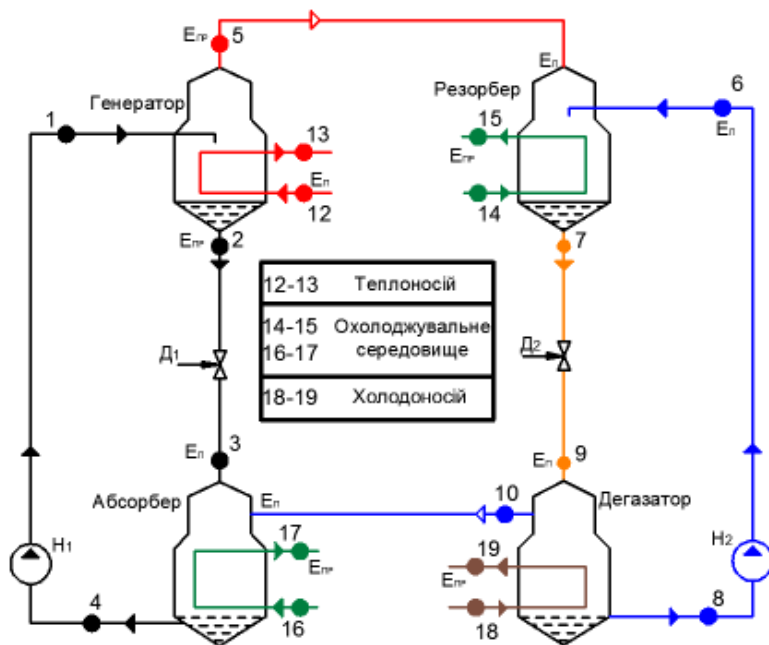


Рис.14. Схема абсорбційно-резорбційної холодильної машини

рація слабкого розчину в резорбційному ступені: $\xi_{a'} = f(T_8, p_o)$; концентрація міцного розчину в резорбційному ступені: $\xi_{r'} = f(T_7, p_k)$. Температура T_5 є середньою температурою у процесі кипіння в генераторі: $T_5 = (T_2 + T_{1*})/2$.

Загальний цикл АРХМ представлено для ексергетичного аналізу двома окремими – циклом термохімічного компресора і циклом резорбційного ступеня.

– витратні характеристики циклів:

Загальна витрата холодоагенту: $m_{хол} = Q_{хол} / [h_{10} - (h_6 - f'(h_6 - h_7))]$

Для термохімічного компресора:

$$m_4 = m_1 = f m_{хол} \quad m_2 = m_3 = (f - 1) m_{хол} \quad f = (\xi_d - \xi_a) / (\xi_r - \xi_a)$$

Для резорбційного ступеня:

$$m_7 = m_9 = f' m_{хол} \quad m_8 = m_6 = (f' - 1) m_{хол} \quad f' = (\xi_d - \xi_{a'}) / (\xi_{r'} - \xi_{a'})$$

Термодинамічний цикл відповідно до рис 15. представлено такими параметрами: температура холодоносія на виході з дегазатора: $T_{хол} = T_{19}$; мінімальна температура дегазації: $T_9 = T_{19} - \Delta T_{хол}$; тиск в дегазаторі: $p_o = f(T_9, \xi_r)$; максимальна температура дегазації: $T_8 = T_{18} - \Delta T_{хол}$; тиск в абсорбері: $p_A = p_o(1 - \Delta p_A)$; мінімальна температура резорбції: $T_7 = T_{14} + \Delta T_k$; тиск в резорбері: p_k – незалежна змінна; максимальна температура генерації: $T_2 = T_{12} - \Delta T_2$; тиск в генераторі: $p_2 = p_k(1 + \Delta p_2)$; температура початку кипіння в генераторі: $T_{1*} = f(\xi_r, p_2)$; мінімальна температура абсорбції: $T_4 = T_{16} + \Delta T_A$; концентрація слабкого розчину в термохімічному компресорі: $\xi_a = f(T_2, p_2)$; концентрація міцного розчину в термохімічному компресорі: $\xi_r = f(T_4, p_A)$; концентрація холодоагенту в резорбційному ступені: $\xi_d = f(T_5, p_k)$; концент-

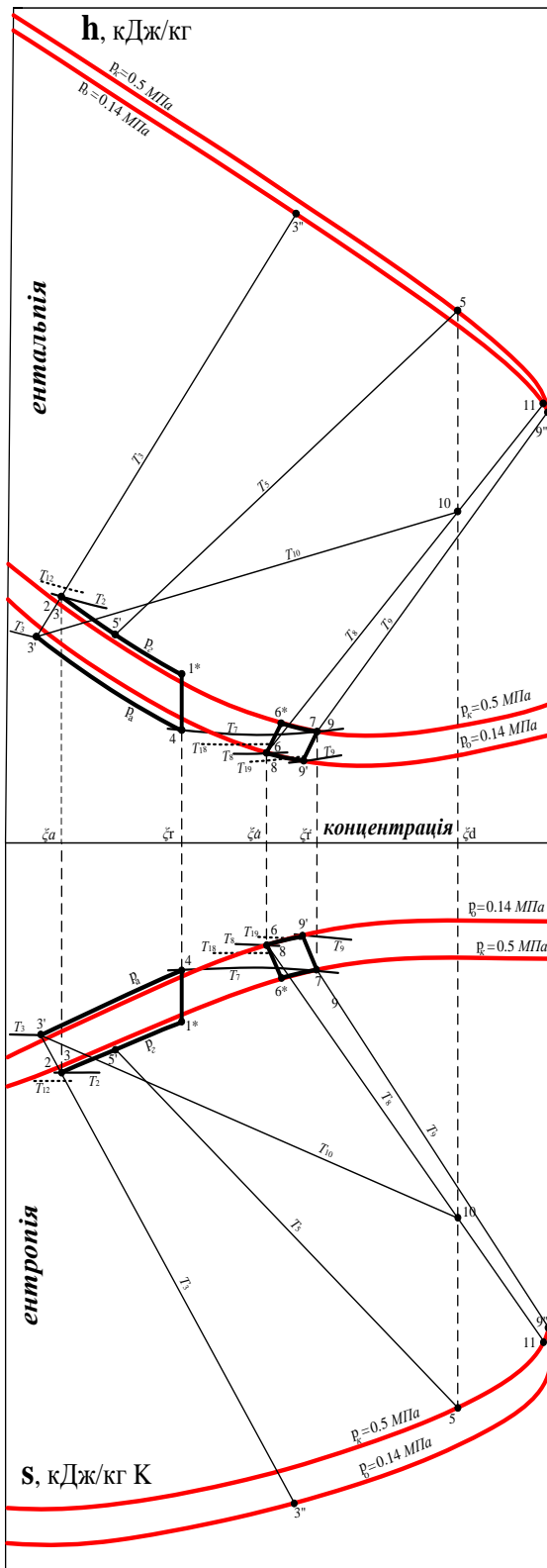


Рис.15. Цикл простої абсорбційно-резорбційної холодильної машини в діаграмах $h - \xi$ і $s - \xi$

– енергетичні потоки:

$$Q_{\Gamma} = m_{\text{хол}} [(h_5 - h_2) + f(h_2 - h_1)] = m_{12-13} (h_{12} - h_{13})$$

$$Q_A = m_{\text{хол}} [(h_{10} - h_3) + f(h_3 - h_4)] = m_{16-17} (h_{16} - h_{17})$$

$$Q_{P3} = m_{\text{хол}} [h_5 - (h_6 - f'(h_6 - h_7))] = m_{14-15} (h_{14} - h_{15})$$

$$Q_{ДЗ} = m_{\text{хол}} [h_{10} - (h_6 - f'(h_6 - h_7))] = m_{18-19} (h_{18} - h_{19})$$

– ексергетичні характеристики компонентів:

$$E_{D,\Gamma} = (E_{12} - E_{13}) - (E_2 + E_5 - E_1)$$

$$E_{D,A} = (E_3 + E_{10} - E_4) - (E_{16} - E_{17})$$

$$E_{D,P3} = (E_5 + E_6 - E_7) - (E_{14} - E_{15})$$

$$E_{D,D} = (E_9^M - E_7^M) - (E_9^T - E_7^T)$$

$$E_{D,ДЗ} = (E_9 - E_{10} - E_8) - (E_{18} - E_{19})$$

Для аналізу АРХМ загальну ексергію, пов'язану з потоками речовини, розділено на термічну складову фізичної ексергії, механічну складову фізичної ексергії та хімічну складову для потоку. Визначення параметрів точок рівноваги з навколишнім середовищем для розрахунку фізичної ексергії сумішей з різними концентраціями демонструє зображення їх за допомогою діаграм $h - \xi$ і $s - \xi$ (рис.16).

Ексергетичний аналіз реального циклу виконано на окремому прикладі. Для розрахунку обрано вихідні параметри, які відповідають дійсним температурним режимам систем тригенерації для фермерського господарства.

Вихідними незалежними постійними параметрами є: холодопродуктивність $Q_{\text{хол}}$, температури $T_{12}, T_{14}, T_{16}, T_{18}, T_{19}$. Температури T_{13}, T_{15}, T_{17} також задані, але в процесі аналізу можуть змінюватися. Всі процеси теплопередавання – ізобарні. Термодинамічний цикл включає всі необоротності:

$$\Delta T_{P3} = 5 \dots 10 \text{ К}, \quad \Delta T_{ДЗ} = 2 \dots 6 \text{ К}, \quad \Delta T_{\Gamma} = 10 \dots 20 \text{ К},$$

$$\Delta p_A = 0,01 \dots 0,015 \text{ МПа}, \quad \Delta p_{\Gamma} = 0,01 \dots 0,02 \text{ МПа},$$

$$\Delta T_A = 5 \dots 10 \text{ К}.$$

Аналіз проведено для кожного компонента індивідуально з урахуванням відповідних необоротностей. Результати аналізу наведено в таблиці 1.

Як свідчать показники, проста АРХМ, яка не ускладнена внутрішньою регенерацією тепла, має ексергетичний ККД на рівні 6%.

Таблиця 1. Результати ексергетичного аналізу АРХМ

Компонент	$E_{F,k}$, кВт	$E_{P,k}$, кВт	$E_{D,k}$, кВт	η_k , %
Генератор	15,94	12,81	3,13	80
Абсорбер	8,57	1,90	6,67	22
Резорбер	3,51	0,94	2,57	27
D_2			0,93	-
D_1			0,27	-
Дегазатор	1,42	1,0	0,42	70
Насос			0,95	-
Машина в цілому	15,94	1,0	14,94	6

Це взагалі позитивний показник для абсорбційної техніки з перспективою зростання.

Термодинамічний аналіз продемонстрував можливість реалізації схемно-циклового рішення

АРХМ для комплектації системи тригенерації малої енергетики.

В розділі розглянуто передумови практичної реалізації абсорбційно-резорбційної холодильної машини з використанням пластинчатих теплообмінників.

У четвертому розділі «Термодинамічний аналіз процесів в тепловикористальних компресорних машинах» розглянуто термодинамічні характеристики компресорної холодильної машини та регенерацію тепла в машині як метод підвищення енергетичної ефективності.

Аналіз проведено окремо для: регенерації тепла у зворотному циклі (класичний РТО₁ парової холодильної машини), у прямому циклі (класичний РТО₂ паросилової машини). Розглянуто перехресну регенерацію тепла (РТО₃) між потоком холодної робочої речовини після насоса (прямий цикл) та гарячої суміші потоків після турбіни (прямий цикл) і компресора (зворотний цикл) та одночасне використання перехресної регенерації і регенерації у зворотному циклі (РТО₃ + РТО₁).

Термодинамічний аналіз впливу регенерації тепла на енергетичну досконалість циклу проведено для всіх схемних рішень. В рефераті наведено результати аналізу на прикладі порівняння рішення з (РТО₃ + РТО₁) (рис. 17) з простим РТО₁ в одному окремому режимі ($t_{zh} = 250\text{ }^\circ\text{C}$;

$$p_{zh} = p_6 = 20\text{ МПа}; p_3 = 7,5\text{ МПа};$$

$$t_3 = 30\text{ }^\circ\text{C}; t_0 = -25\text{ }^\circ\text{C}; Q_0 = 100\text{ кВт}.$$

Енергетичні потоки в графічній формі надано в координатах Q-T (рис.18).

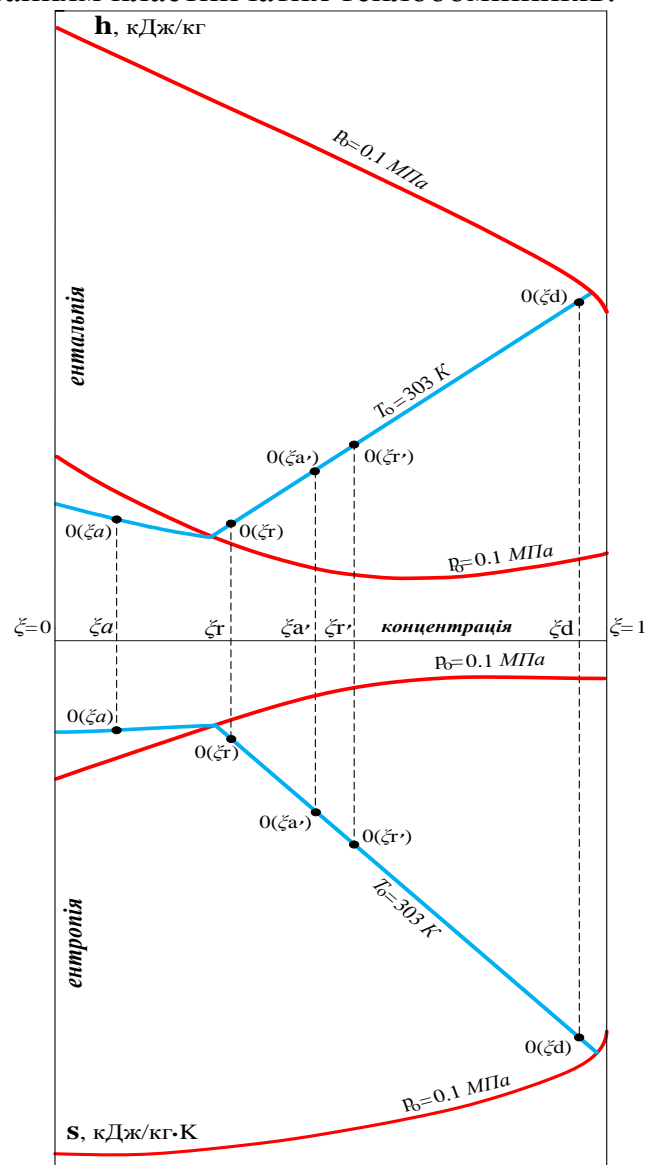


Рис.16. Визначення точок 0 для значень ексергії сумішей із різними концентраціями ($\xi_a, \xi_r, \xi_d, \xi_a', \xi_r'$)

Результати розрахунків демонструють рис.19, 20.

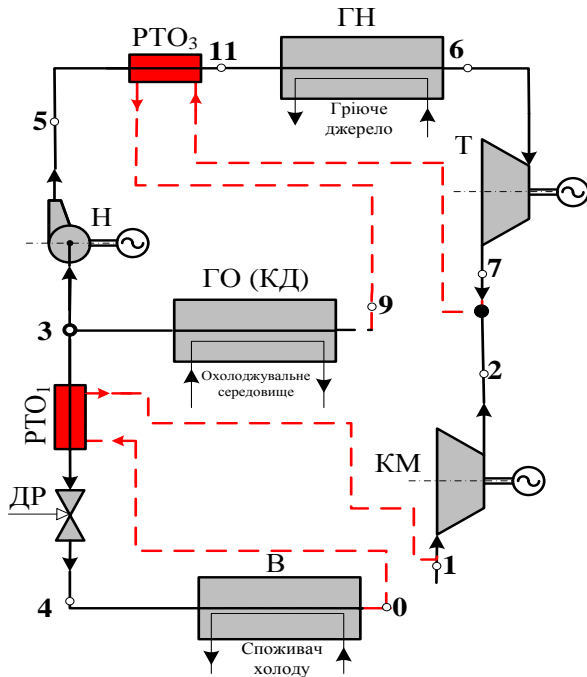


Рис.17. Схема машини з (PTO3 + PTO1)

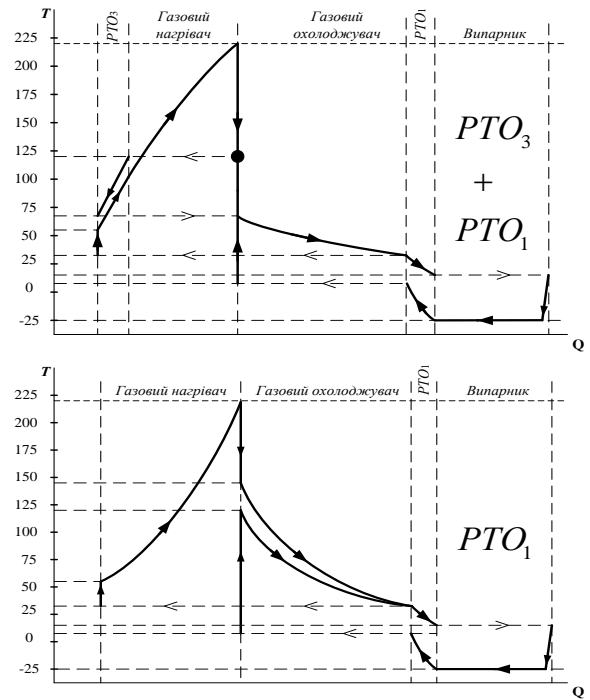


Рис.18. Енергетичні потоки

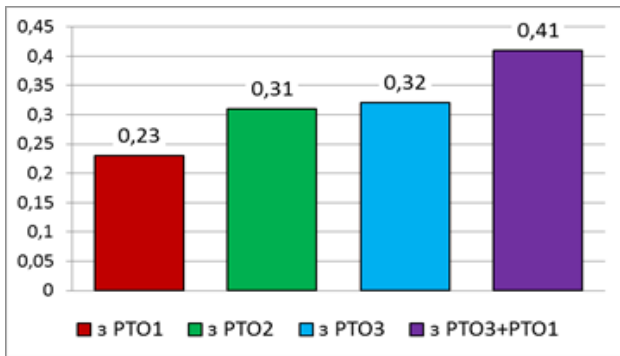


Рис.19. Енергетична ефективність COP

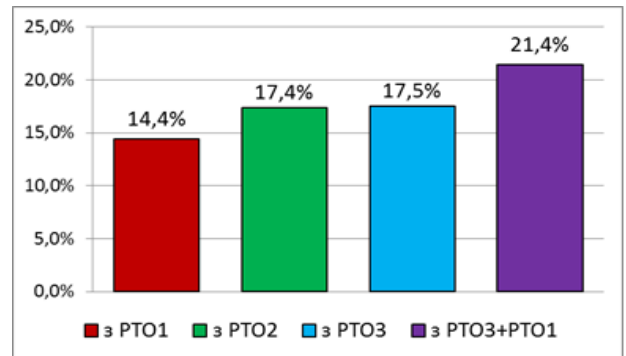


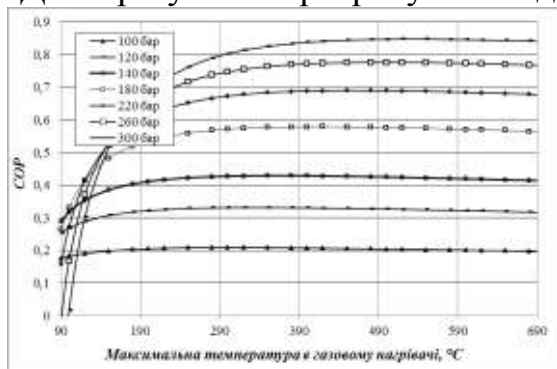
Рис.20. Ексергетична ефективність машини η_{EM}

Використання схеми регенерації (PTO3+PTO1) підвищує енергетичну ефективність машини майже вдвічі, а ексергетичну ефективність – на 30%.

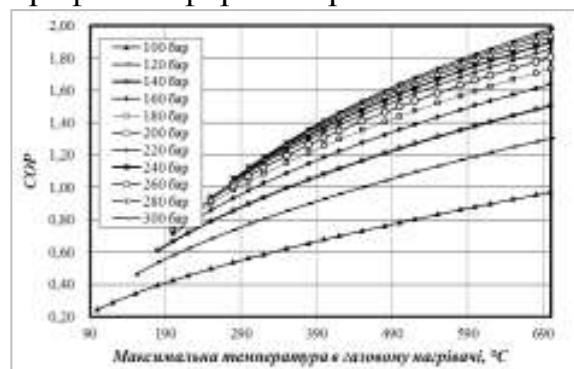
Оптимізацію характеристик машини з (PTO3+PTO1) з'ясовано шляхом розрахунків за змінними вихідними параметрами: $t_{гн} = 90...700 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$;

$p_{гн} = p_6 = 10...30 \text{ МПа}$; $p_3 = 7,5 \text{ МПа}$; $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $\eta_T = 0,85$; $\eta_H = 0,9$; $\eta_{KM} = 0,8$; $\eta_{ed} = 0,95$; $\eta_{ez} = 0,95$; $Q_0 = 100 \text{ кВт}$.

Деякі результати розрахунків надано в графічній формі на рис. 21-24.

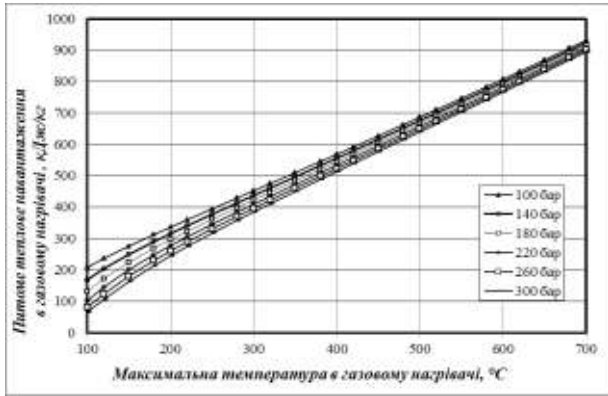


а) без регенерації

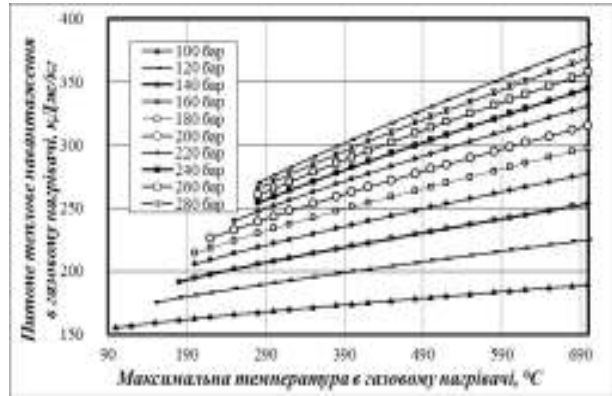


б) з регенерацією

Рис.21. Залежність COP від тиску $p_{гн}$ та температури $t_{гн}$ в газовому нагрівачі



а) без регенерації

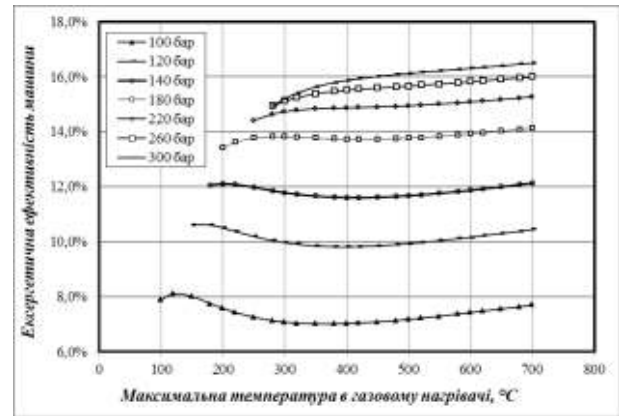


б) з регенерацією

Рис.22. Залежність питомого теплового навантаження на газовий нагрівач q_{gn} від тиску p_{gn} та температури t_{gn} в ньому

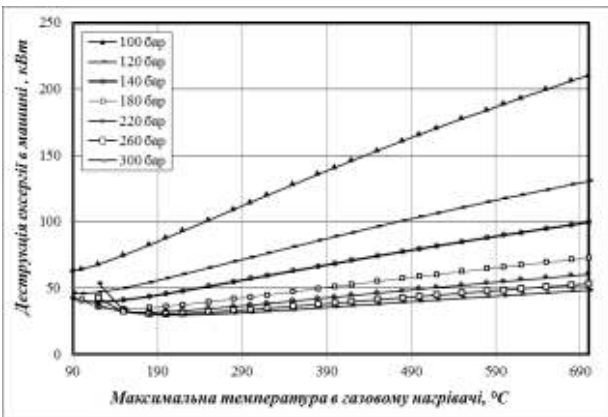


а) без регенерації

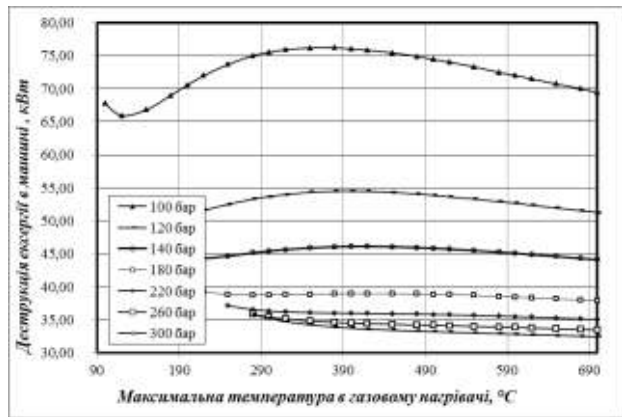


б) з регенерацією

Рис.23. Залежність ексергетичної ефективності машини η_{em} від тиску p_{gn} та температури t_{gn} в газовому нагрівачі



а) без регенерації



б) з регенерацією

Рис.24. Залежність загальної деструкції ексергії E_{om} від тиску p_{gn} та температури t_{gn} в газовому нагрівачі

Зростання тиску та температури робочої речовини в газовому нагрівачі сприяє підвищенню коефіцієнта перетворення COP в 1.2...2.8 рази.

При низьких температурах та високих тисках в газовому нагрівачі практична реалізація машини не має сенсу, машина має низькі значення COP до 0,2.

Питомі характеристики газового нагрівача q_{gn} зростають у всьому інтервалі тисків та температур в нагрівачі. При цьому q_{gn} не залежить від тиску, а лише від

температури.

В розділі здійснено пошук схемно-циклового рішення низькотемпературної тепловикористальної компресорної холодильної машини з CO₂, який базується на загальному методі порівняльної оцінки термодинамічних циклів, що визначило практичну доцільність реалізації і впровадження нового технічного рішення.

Для складного циклу машини створюються умови, за яких процеси в прямому циклі здійснюються в надкритичній області, а в зворотному в двох областях – в надкритичній і двофазній із використанням двоступеневого стиснення.

Прямий цикл реалізується з вільним вибором робочих тисків $p_{гн} > p_{го} > p_{кр}$ і температур $T_{гн} > T_{го} > T_{кр}$. Процеси в зворотному циклі здійснюються в межах температур і тисків: критичних і потрійної точки.

При встановлених основних граничних параметрах загального циклу розглянуто три варіанти схемно-циклового рішення машини з двоступеневим зворотним циклом та різним способом проміжного охолодження між компресорами: без проміжного охолодження; із впорскуванням вологої пари проміжного тиску у всмоктувальну лінію КВС; з проміжним охолодженням між компресорами у віддільнику рідини (ВР) проміжного тиску.

Аналіз надано двома блоками. Блок перший – аналіз двоступеневих зворотних циклів для всіх схем, умови: $p_{np} = \text{var}$, $p_{ог} = \text{const}$ і $T_{го} = \text{const}$. Блок другий – аналіз загального циклу машини проведено із зворотним циклом без проміжного охолодження. Зворотний цикл реалізується за $p_{np} = \text{const}$, прямий – за $p_{гн} = \text{var}$, і $T_{гн} = \text{var}$.

Вибір проміжного тиску p_{np} для зворотного циклу та розрахунки характеристик машини здійснено відповідно до теорії холодильних машин при вирішенні однієї з трьох задач: енергетичної, транспортної та уніфікації (експлуатаційної надійності).

Вихідні дані для розрахунку: $t_o = -50^{\circ}\text{C}$; $t_{гн} = 300 \dots 400^{\circ}\text{C}$; $p_{гн} = 10 \dots 20$ МПа; $t_{сер} = 30^{\circ}\text{C}$; $p_{го} = 7$ МПа; $p_{np} = 2 \dots 4$ МПа; $\eta_{KM} = 0,8$; $\eta_T = 0,85$; $\eta_H = 0,7$.

Розрахунки показали переваги схемно-циклового рішення з віддільником рідини (ВР), яке зображено на рис. 25.

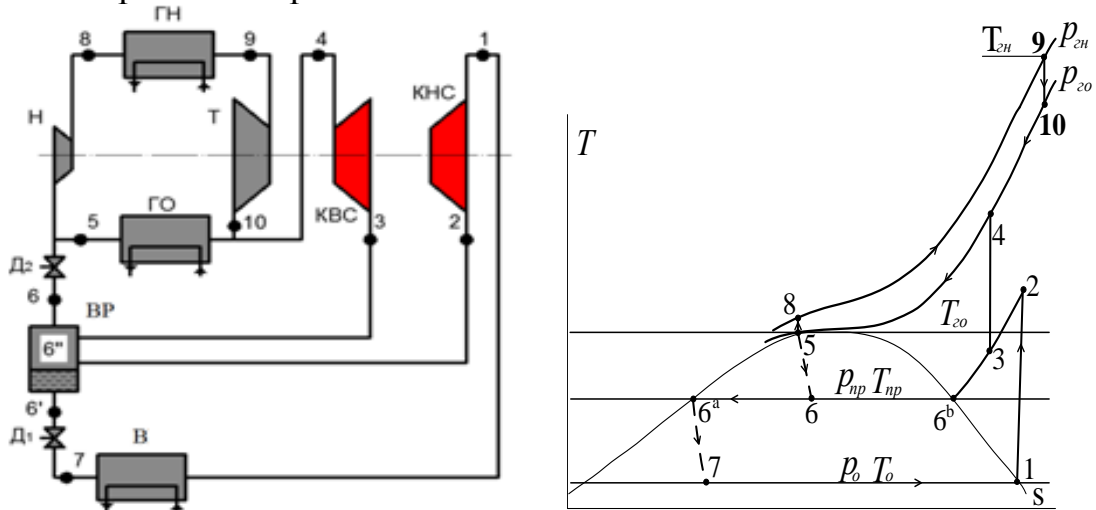


Рис.25. Схемно-циклове рішення: а) схема; б) цикл в діаграмі T-s

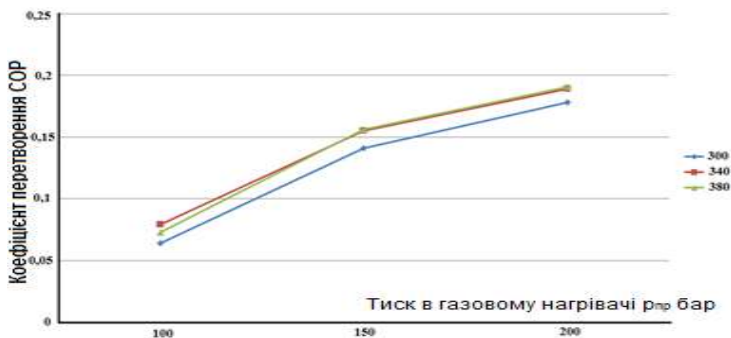


Рис.26. Коефіцієнт перетворення COP машини в залежності від тиску та температури в газовому нагрівачі

Коефіцієнт перетворення COP машини в цілому за прийнятими в газовому нагрівачі тисками (10...20 МПа) та температурами (300...400 °C) залежить від тиску і майже незмінний за температурою (рис.26). Температури гріючого джерела лише забезпечують температурний рівень охолоджуваного об'єкта.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Встановлено, що всі типи тепловикористальних машин з NH₃-H₂O та CO₂ робочими речовинами можуть комплектувати системи тригенерації малої енергетики з розв'язанням завдань енергозбереження та екологічної безпеки, мають індивідуальну область застосування і не є альтернативою іншим.

2. За умови одночасних процесів перехресної регенерації тепла в прямому і зворотному циклах та регенерації тепла у зворотному циклі, спостерігається підвищення експлуатаційної надійності та максимальної енергетичної ефективності компресорної тепловикористальної холодильної машини, яка вдвічі вища за ефективність машини без регенерації, а ексергетична ефективність – на 30%.

3. Вперше запропоновано технологічну схему з високою енергетичною ефективністю ($\eta_E = 0,42...0,65$) та екологічною безпекою, в якій енергетична установка та холодильна машина мають єдину робочу речовину – CO₂. У цьому випадку тепловикористальна машина самостійно виконує функції системи тригенерації.

4. Вперше розроблено схемно-циклове рішення низькотемпературної компресорної тепловикористальної холодильної машини з CO₂ з двоступеневим зворотним циклом на рівні температур в охолоджуваному об'єкті -50 °C. Коефіцієнт перетворення машини в залежності від вихідних параметрів становить 0,08...0,2. Може бути альтернативою до інших видів низькотемпературних холодильних машин, зокрема абсорбційних з NH₃-H₂O.

5. Дослідженням виявлено, що енергетична ефективність абсорбційно-резорбційної холодильної машини в режимах тригенерації в залежності від співвідношення вихідних параметрів становить 0,25...0,65, що є класичним показником для абсорбційної техніки.

6. Дослідженням встановлено, що проста АРХМ, яка не ускладнена внутрішньою регенерацією тепла, має ексергетичний ККД на рівні 6% з перспективою зростання.

7. За вибором вихідних параметрів в компонентах АРХМ виконуються умови, наближені до зовнішньої оборотності в процесах генерації і дегазації, що підтверджується високими значеннями ексергетичного ККД генератора – 80% та дегазатора – 70%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Грудка Б.Г. Тригенерація – источник энергосбережения в малой энергетике для аграрного производства / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – №4(51). – С. 65-69.

Особистий внесок: огляд літературних джерел, аналіз інформації щодо теми публікації, варіантні розрахунки, підготовка матеріалів до публікації.

2. Грудка Б.Г. Аналіз схемних рішень компресорної тепловикористальної холодильної машини з R744 / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук // Восточно-европейский журнал передовых технологий [EJET]. – 2016. – Т.1, №8(79). – С. 29-39.

Особистий внесок: аналіз класифікації енергоперетворювальних систем, варіантні розрахунки енергетичної та ексергетичної ефективності циклів компресорних машин з різними системами регенерації тепла, підготовка матеріалів до публікації.

3. Грудка Б.Г. Аналіз характеристик прямого циклу тепловикористальної компресорної машини з R744 / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – №2 (52). – С. 12-22.

Особистий внесок: огляд літературних джерел з інформацією щодо використання утилізованого тепла енергетичних установок, розрахунки енергетичної та ексергетичної ефективності прямих циклів тепловикористальних машин за змінними вихідними параметрами циклів. Аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.

4. Грудка Б.Г. Энергетическая эффективность абсорбционно-резорбционной холодильной машины в системе тригенерации малой энергетике / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – №4 (52). – С. 4-10.

Особистий внесок: аналіз можливості створення системи тригенерації для фермерського господарства, вибір сорбційних машин для систем тригенерації, енергетичний аналіз циклу абсорбційно-резорбційної машини, підготовка матеріалів до публікації.

5. Study of a tri-generation system based on a supercritical CO₂ cycle / T. Morosuk, G. Tsatsaronis, L. Morozyuk et al. // 1st European Seminar on Supercritical CO₂ (sCO₂) Power Systems. – Vienna, Austria, 29-30.09.2016.

Особистий внесок: варіантні розрахунки тепловикористальних компресорних холодильних машин на CO₂ в режимі системи тригенерації.

6. Грудка Б.Г. Новые технические решения тригенерации в малой энергетике / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук // «Казахстан-Холод 2017»: Сб. докл. межд. науч.-техн. конф. – Алматы: АТУ, 15-16.03.2017. – С.166-174.

Особистий внесок: аналіз енергетичного балансу систем тригенерації, формування нових технічних рішень, варіантні розрахунки сезонних потреб утилізованого тепла, підготовка матеріалів до публікації.

7. Грудка Б.Г. Введение в эксергетический анализ абсорбционно-резорбционной холодильной машины / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – №1 (53). – С. 4-10.

Особистий внесок: огляд літературних джерел щодо ексергетичного аналізу абсорбційних машин, створення ексергетичної моделі абсорбційно-резорбційної холодильної машини, підготовка матеріалів до публікації.

8. Низкотемпературные теплоиспользующие компрессорные холодильные машины с R744 / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук и др. // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – №2(53). – С. 4-13.

Особистий внесок: огляд літературних джерел з низкотемпературних компресорних холодильних машин різного призначення на CO₂, участь в формуванні схемно-циклового рішення тепловикористальної низкотемпературної машини, підготовка матеріалів до публікації.

Публікації апробаційного характеру

1. Грудка Б.Г. Создание системы тригенерации с использованием резорбционной теплофикационной машины [Текст] / Б.Г. Грудка // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» – 2014. – с. 53-54.

2. Грудка Б.Г. Области рационального применения теплоиспользующих машин в системах тригенерации [Текст] / Б.Г. Грудка // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» – 2015. – с. 17-18.

3. Грудка Б.Г. Перспективы использования абсорбционно-резорбционных холодильных машин в системах тригенерации [Текст] / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк // 10-а Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» – 2015. – с. 32-33.

4. Грудка Б.Г. Анализ характеристик абсорбционно-резорбционной холодильной машины [Текст] / Б.Г. Грудка // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» – 2016. – с. 14-15.

5. Грудка Б.Г. Энергетическая эффективность абсорбционно-резорбционной холодильной машины в системе тригенерации малой энергетики [Текст] / Б.Г. Грудка // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» – 2017. – с. 24-26.

6. Грудка Б.Г. Тригенерационные технологии производства низкотемпературного жидкого диоксида углерода, электроэнергии, тепла и холода [Текст] / Б.Г. Грудка, Л.И. Морозюк, С.В. Гайдук // 7-ий Міжнародний семінар «NH₃ & CO₂-2017» – 2017. – с. 21-23.

АНОТАЦІЯ

Грудка Б.Г. Термодинамічний аналіз тепловикористальних холодильних машин в системах тригенерації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська національна академія харчових технологій. МОН України, Одеса, 2017.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми – підвищенню енергетичної ефективності та екологічної безпеки малих енергетичних установок шляхом впровадження системи тригенерації – цілорічного виробництва електричної енергії, тепла і холоду за використанням одного виду первинної енергії – тепла. Проведено порівняльний аналіз характеристик існуючих сучасних типів

тепловикористальних машин. Встановлено, що комплектувати системи тригенерації малої енергетики з вирішенням завдань енергозбереження та екологічної безпеки доцільно абсорбційними машинами з $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ або тепловикористальними компресорними з CO_2 робочими речовинами.

Термодинамічний аналіз різних типів абсорбційних машин вказав на переваги абсорбційно-резорбційної холодильної машини, обумовлені зовні оборотними процесами генерації і дегазації (температура робочої речовини змінюється подібно зміні температури джерела тепла). Оцінено енергетичну та ексергетичну ефективність зазначеної холодильної машини в температурному режимі системи тригенерації малої енергетики.

Дослідження компресорних тепловикористальних машин пов'язано з розробкою нових схемно-циклових рішень з регенерацією тепла в прямому і зворотному циклах машини, при перехресному теплообміні в циклах. Визначення енергетичної досконалості прийнятих рішень з одночасним вирішенням завдань енергозбереження виконано енергетичним і ексергетичним методами термодинамічного аналізу. Запропоновано низькотемпературну (до -50°C) тепловикористальну компресорну машину з двоступеневим зворотним циклом та систему тригенерації з єдиною робочою речовиною CO_2 в енергетичній установці і холодильній машині. Термодинамічний аналіз двох останніх схемно-циклових рішень оцінив можливість їх практичної реалізації.

Ключові слова: Мала енергетика, тригенерація, енергетична ефективність, абсорбційно-резорбційна холодильна машина, компресорна тепловикористальна холодильна машина, регенерація тепла, ексергетичний аналіз, енергетичний аналіз.

АННОТАЦІЯ

Грудка Б.Г. Термодинамический анализ теплоиспользующих холодильных машин в системах тригенерации. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская национальная академия пищевых технологий. МОН Украины, Одесса, 2017.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – повышению энергетической эффективности и экологической безопасности малых энергетических установок путем внедрения системы тригенерации – круглогодичного производства электрической энергии, тепла и холода при использовании одного вида первичной энергии – тепла. Проведен сравнительный анализ характеристик существующих современных типов теплоиспользующих машин. Установлено, что комплектовать системы тригенерации малой энергетики с решением задач энергосбережения и экологической безопасности целесообразно абсорбционными машинами с $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ или теплоиспользующими компрессорными с CO_2 рабочими веществами.

Термодинамический анализ различных типов абсорбционных машин указал на преимущества абсорбционно-резорбционной холодильной машины, обусловленные внешне обратимыми процессами генерации и дегазации (температура рабочего вещества изменяется подобно изменению температуры источника тепла). Оценена энергетическая и эксергетическая эффективность указанной холодильной машины в температурном режиме системы тригенерации малой энергетики. На примере фермерского хозяйства приведен способ формирования малой системы тригенерации.

Исследование компрессорных теплоиспользующих машин с CO_2 связано с разработкой новых схемно-цикловых решений с регенерацией тепла в прямом и обратном циклах машины, при перекрестном теплообмене в циклах. Определение энергетического совершенства принятых решений с одновременным решением задач энергосбережения выполнено энергетическим и эксергетическим методами термодинамического анализа. Предложена низкотемпературная (до -50°C) теплоиспользующая компрессорная машина с двухступенчатым обратным циклом и систему тригенерации с единым рабочим веществом CO_2 в энергетической установке и холодильной машине. Термодинамический анализ двух последних схемно-цикловых решений оценил возможность их практической реализации.

Ключевые слова: Малая энергетика, тригенерация, энергетическая эффективность, абсорбционно-резорбционная холодильная машина, компрессорная теплоиспользующая холодильная машина, регенерация тепла, эксергетический анализ, энергетический анализ.

ABSTRACT

Hrudka B. Thermodynamic analysis of the heat-driven refrigeration machines within trigeneration systems. – The manuscript.

The thesis for Candidate of science degree by specialty 05.10.14 – «Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems». – Odessa national academy of food technologies. MESYS of Ukraine, Odessa, 2017.

The dissertation is devoted in solving a relevant scientific and technical problem that is the increasing the energy efficiency and ecological effectiveness of the small energy systems through the introduction of the trigeneration for year-round generation of electrical energy, heat and cold using heat as the only source of driving energy.

The comparative analysis of modern types of the heat-driven refrigeration machines has been conducted. It was found out that the implementation of the $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ absorption refrigeration machines as well as heat-driven compression machines with CO_2 as the working fluid to the trigeneration systems of small energetics is feasible from the point of view of energy efficiency and ecological effectiveness.

The thermodynamic analysis of different types of absorption machines demonstrated the advantages of the absorption-resorption refrigeration machines: the external reversibility within the processes of generation and degasation (the temperature profile of the working fluid is similar to the temperature profile of heat source/sink). A farmer household is used as an application example for the formation of the small trigeneration system.

The research of the compression heat-driven machines with CO_2 as the working fluid has been done to the direction of creating the new cycles and schemes where the heat regeneration process is used within direct and inverse cycles as well as between these cycles. The energetic evaluation of the new cycles and schemes taking into account the options for energy saving has been performed using energy and exergy analyses. New cycles and schemes of the low-temperature (up to -50°C) compression heat-driven refrigeration machines with two-stage inverse cycle and trigeneration system with CO_2 as the working fluid for power generation system and refrigeration machine have been proposed. The practical feasibility of these machines has been confirmed using the results obtained from the thermodynamic analysis.

Keywords: Small energetics, energy efficiency, absorption-resorption refrigeration machine, compression heat-driven refrigeration machine, heat regeneration, energy analysis, exergy analysis.

Підписано до друку 30.03.2018
Обсяг 0.9 авт. арк. Формат 60x84/16
Тираж 100 прим. Папір офсетний. Зам. № 2348

Надруковано у копіювальному центрі «Греческий дом»
(Свідоцтво 23206828 від 21.05.2004)
м. Одеса, вул. Віце-адмірала Жукова, 3/7
Тел./факс: (0482) 375-235