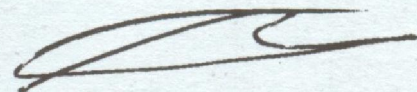


Авторефер.
Г14

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГАЙДУК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ



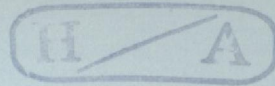
УДК 621.574:536.75

РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ
ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ
З ДІОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2014



Дисертація є рукописом.

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

Науковий керівник –

ОНАХТ Автореф
Розроблення та аналі



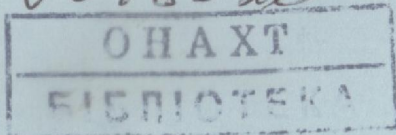
v018626

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 холодильних машин, установок і кондиціонування повітря

Офіційні опоненти –

доктор технічних наук, професор,
Денисова Алла Євсєївна,
Одеський національний політехнічний університет, МОН України, професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій

v018626



доктор технічних наук, доцент,
Гакал Павло Григорович
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського, «Харківський авіаційний інститут», МОН України, завідувач кафедри аерокосмічної теплотехніки

Захист дисертації відбудеться «29» вересня 2014 р. о 14³⁰ годині 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.

бібліотеці Одеської національної академії
Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Утилізація бросових джерел тепла енергетичних установок і технологічних процесів промислових підприємств з різними температурними рівнями – одна із основних умов економії енергетичних ресурсів.

Для холодильної техніки як енергоємної галуззі господарства будь-якої держави перспективою є удосконалення тепловикористальних машин з розширеною можливістю утилізації тепла в сукупності з створенням нових схемно-циклових рішень, що сприятиме зменшенню її енергетичної залежності.

В класифікаційну групу енергоперетворювальних тепловикористальних машин входять абсорбційні, ежекторні машини і парокомпресорні з приводом від турбіни, яка працює на єдиній робочій речовині з холодильною машиною.

Компресорні машини було створено останніми в даному класі і мали високу енергетичну ефективність.

Однак експлуатація компресорних тепловикористальних машин сьогодні неможлива, в зв'язку з заборонаю на робочі речовини R11, R12 і R22. Через це компресорні тепловикористальні машини не отримали завершеного дослідження.

Відродження досліджень компресорних тепловикористальних машин з метою їх подальшої реалізації, яка пов'язана з вибором нових робочих речовин за умови енергозбереження, є актуальним науково-технічним завданням.

На підставі аналізу теплофізичних властивостей групи робочих речовин холодильних машин пріоритет було надано діоксиду вуглецю (R744). Про практичне застосування R744 в тепловикористальних машинах і створення схемно-циклових рішень інформація відсутня, тому тема роботи має надзвичайну перспективу.

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 №148 «Про комплексну державну програму енергозбереження України» від 05.02.1997 р., Закону Верховної Ради України №2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 р., Законом України №2509-IV «Про комбіноване використання теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного потенціалу» від 05.04.2005 р.,

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення і аналіз схемно-циклових рішень компресорних енергоперетворювальних систем з діоксидом вуглецю, в яких у якості первинної енергії використовується тепло.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені і вирішені такі основні завдання:

- Створити схемно-циклове рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини з R744 за умови використання термодинамічного аналізу.
- Провести аналіз впливу регенерації тепла на енергетичну ефективність циклу компресорної тепловикористальної холодильної машини.
- Розробити схемно-циклове рішення системи тригенерації на базі компресорної тепловикористальної холодильної машини з діоксидом вуглецю.

- Провести енергетичний та ексергетичний аналіз енергоперетворювальної компресорної тепловикористальної системи для оцінки її енергетичної ефективності.

Об'єктом дослідження є енергоперетворювальна компресорна тепловикористальна системи з діоксидом вуглецю.

Предметом дослідження є термодинамічні процеси в енергоперетворювальній компресорній тепловикористальній системі з діоксидом вуглецю.

Методи дослідження: термодинамічний аналіз та числове моделювання термодинамічних процесів в елементах енергоперетворювальної компресорної тепловикористальної системи. Основою математичного моделювання є рівняння класичної термодинаміки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

- Вперше створено схемно-циклове рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини, на підставі використання термодинамічного аналізу методом циклів, що уможливорює формування комплексу схема-температурний режим для розв'язання завдань енергозбереження.

- Доведено, що зростання енергетичної ефективності компресорної тепловикористальної холодильної машини забезпечено за умови регенерації тепла у прямому циклі, у перехресній - в прямому і зворотному або при одночасній перехресній і регенерації тепла у зворотному циклі.

- Вперше запропоновано схемно-циклове рішення системи тригенерації з утилізацією тепла енергетичної установки на базі компресорної тепловикористальної холодильної машини з R744 з регульованим співвідношенням всіх корисних ефектів: отримання електроенергії, тепла і холоду.

- Доведено, що енергетична ефективність енергоперетворювальної компресорної тепловикористальної системи, яку визначено енергетичним та ексергетичним методами термодинамічного аналізу, залежить від комбінації схеми і температурного режиму.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій визначаються: коректною постановкою завдання і його вирішення з побудовою математичної моделі на класичних рівняннях термодинаміки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у такому:

- Розроблено схемно-циклове рішення тепловикористальної холодильної машини є підставою для практичної реалізації машини з використання устаткування, арматури і систем автоматики, які випускаються світовими фірмами для роботи з діоксидом вуглецю.

- Розроблено схемні-циклові рішення систем тригенерації з R744 є універсальними і рекомендовані до реалізації як самостійні системи, так і в складі енергетичних установок.

- Розроблено методи ексергетичного аналізу систем тригенерації рекомендовані до використання під час проектування реальних установок.

- Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі підготовки студентів спеціальності 7.05060403, 8.05060403 «Холодильні машини і установки» в курсах лекцій «Теоретичні основи холодильної техніки» та «Сучасні тепловикористальні холодильні машини», 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 холодильних машин, установок та кондиціювання повітря ОНАХТ. Результати дисертаційної роботи доповідались на Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодної техніки і технологій» (м. Одеса, Україна, 2011, 2012), «Техніка і технологія харчових виробництв» (Донецьк, 2011), «Иновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва 2010), 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 75-річчю створення Миколаївської обл. (Миколаїв, 2012), 9-ій Міжнародній науково-технічній конференції. «Сучасні проблеми холодної техніки і технологій» (Одеса, 2013)

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 11 публікаціях, з яких 4 статі (2 одноосібні) опубліковано у спеціалізованих наукових журналах, затверджених ДАК МОН України, 1 стаття – у спеціалізованому міжнародному науковому журналі, 1 патент на корисну модель та 5 тез доповідей на конференціях.

Об'єм і структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури. Зміст роботи викладено на 176 сторінках машинописного тексту, включаючи 145 малюнків, список використаних джерел із 122 найменувань на 14 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, які впливають із сучасного стану проблеми, викладені наукові положення, новизна, основні результати та визначено їх практична цінність, наведено відомості про апробацію результатів роботи і публікації, вказано особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто сучасний стан проблеми створення тепловикористальних машин і енергоперетворювальних систем на їх базі. Проаналізовано класифікацію енергоперетворювальних систем та виконано критичний аналіз існуючих схемних рішень тепловикористальних холодильних машин за робочими речовинами та температурними рівнями джерел тепла. Наведено огляд енергоперетворювальних систем різного призначення, у яких у якості робочої речовини використовується R744. У результаті аналізу отриманої інформації сформовано основні завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі створюється схемно-циклове рішення тепловикористальної компресорної холодної машини з R744 з використанням термодинамічного аналізу методом циклів. Формування циклової моделі здійснюється поетапно, аналізуючи зменшення енергетичної ефективності на кожному етапі від ідеального циклу-зразку до дійсного циклу.

Цикли тепловикористальної холодної машини з точки зору термодинаміки – поєднання прямого і зворотного циклів, в яких використовується єдина робоча

речовина, за умови, що зберігається баланс роботи в прямому і зворотному циклах тому для побудови складного циклу-зразка використано два прості термодинамічні цикли.

В залежності від властивостей R744 (низька критична температура) і поєднання джерел тепла, запропоновано чотири комбінації циклів: Карно-Карно, Карно-Джоуль, Джоуль-Карно, Джоуль-Джоуль. На першому етапі аналізу обрано цикл-зразок «Карно-Карно» (рис.1), який побудовано на граничних температурах: об'єкт охолодження $T_{хол}$; охолоджуюче середовище $T_{сер}$; гріюче джерело $T_{гр}$.

Єдина робоча речовина у прямому і зворотному циклах об'єднує їх в один складний загальний цикл (рис.2), і на підставі аналізу працездатності циклового рішення зразком обрано цикл 2б.

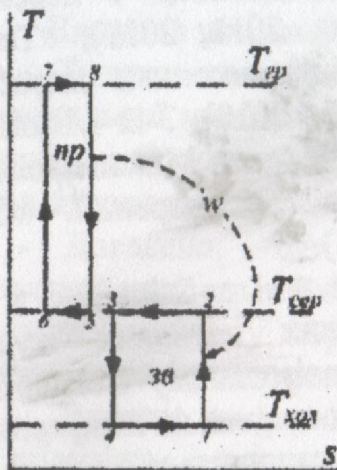


Рис.1

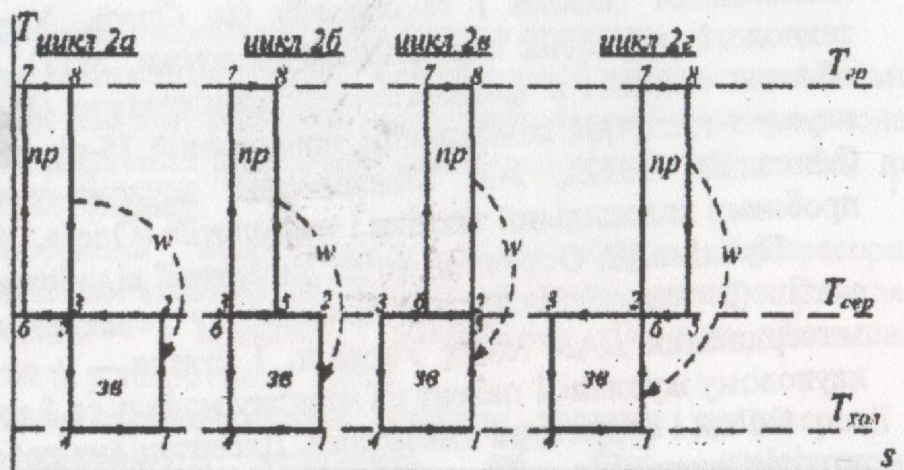


Рис 2

Термодинамічні властивості R744 враховано введенням пограничних кривих, ізобарних процесів підведення і відведення тепла в прямому циклі і процесу стиснення сухої насиченої пари в компресорі (рис.3. цикл 3), ізобарних процесів підведення і відведення тепла в зворотному циклі (рис.3, цикл 4) і введення внутрішніх необоротностей в обох циклах (рис. 3, цикл 5). Внутрішні необоротності в процесах 1-2, 3-5 і 6-7 характеризують коефіцієнти корисної дії (ККД) відповідних елементів.

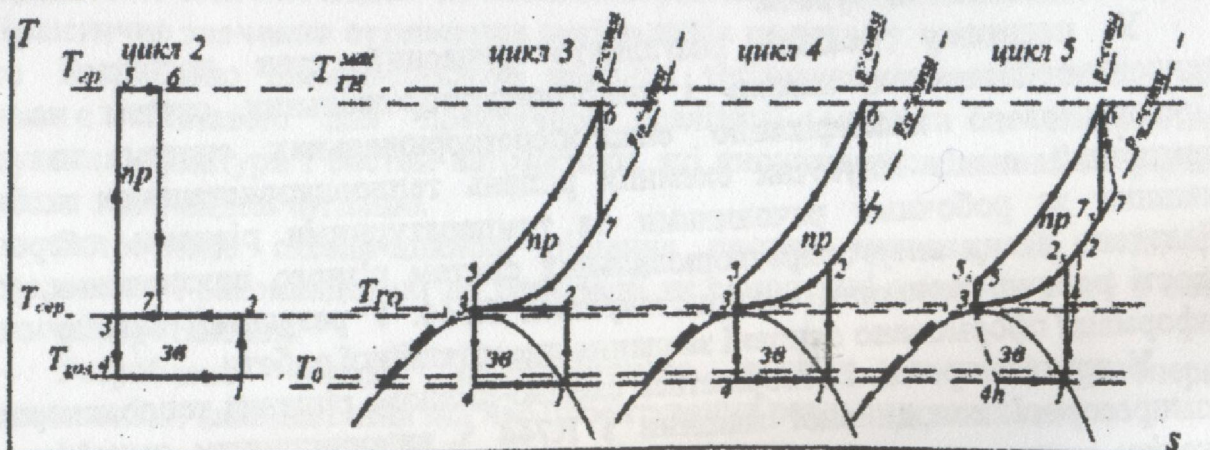


Рис. 3. «Метод циклів» у формуванні схемно-циклового рішення

Дійсному циклу відповідає схемне рішення тепловикористальної холодильної машини з R744 в якості робочої речовини (рис. 4), яке захищене патентом.

В роботі докладно надано елементний склад машини, принцип роботи за умови співвідношення критичної температури R744 і охолоджуючого середовища $T_{сер}$.

Для створеного схемно-циклового рішення було розроблено математичну модель термодинамічних процесів, для енергетичного і ексергетичного аналізу процесів.

Енергетичний аналіз машини побудовано в послідовності:

- питоме тепло, підведене в газовому нагрівачі $q_{ГН} = h_6 - h_3, \text{кДж / кг}$
- питома адіабатна робота, отримана в турбіні $w_T = h_6 - h_7, \text{кДж / кг}$
- питома дійсна робота, отримана в турбіні $w_{Td} = (h_6 - h_7) \cdot \eta_T = w_T \cdot \eta_T, \text{кДж / кг}$
- питома адіабатна робота, затрачена в насосі $w_H = h_3 - h_2, \text{кДж / кг}$
- питома дійсна робота, затрачена в насосі $w_{Hd} = (h_3 - h_2) / \eta_H, \text{кДж / кг}$
- питома адіабатна робота, затрачена в компресорі $w_{KM} = h_2 - h_1, \text{кДж / кг}$
- питома дійсна робота, затрачена в компресорі $w_{KMd} = (h_2 - h_1) / \eta_{KM}, \text{кДж / кг}$
- питоме тепло, підведене у випарнику $q_0 = h_1 - h_4, \text{кДж / кг}$
- питоме тепло, відведене в газовому охолоджувачі зворотного циклу $q_{ох} = h_2 - h_3, \text{кДж / кг}$
- питоме тепло, відведене в газовому охолоджувачі прямого циклу $q_{ос} = h_7 - h_3, \text{кДж / кг}$
- масова витрата робочої речовини в зворотному циклі $M_{азв} = Q_0 / q_0, \text{кг / с}$
- масова витрата робочої речовини в прямому циклі $M_{апр} = (M_{азв} \cdot w_{KMd} / \eta_{од}) / (w_{Td} \cdot \eta_{еє} - w_{Hd} / \eta_{од}), \text{кг / с}$
- потужність турбіни $W_T = M_{апр} \cdot w_m, \text{кВт}$
- потужність насоса $W_H = M_{апр} \cdot w_H, \text{кВт}$
- потужність компресора $W_{KM} = M_{азв} \cdot w_{KM}, \text{кВт}$
- теплове навантаження на газовий нагрівач $Q_m = M_{апр} \cdot q_{ГН}, \text{кВт}$
- коефіцієнт перетворення енергії $COP = Q_0 / Q_{ен}$

При створенні математичної моделі ексергетичного аналізу було використано чотири поняття, які введені в світову термінологію прикладної термодинаміки:

- «Паливо» - ексергетичний потік ($E_{п}$), що постачає компонент ексергією, в тому числі потік від зовнішнього джерела (паливо для всієї системи);
- «Продукт» - ексергетичний потік ($E_{пр}$), що сприймає ексергію від «палива». Цей потік асоціюється з корисним ефектом (в ексергетичному виразі), отриманим в

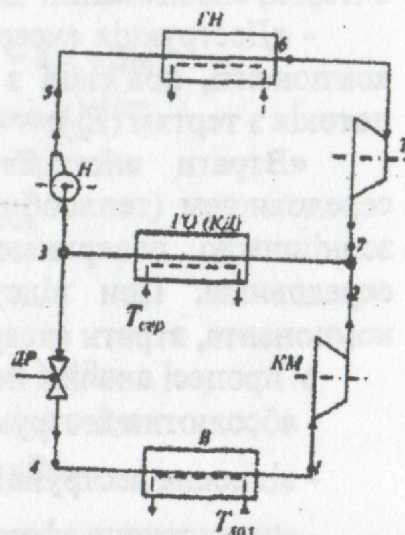


Рис. 4. Схема компресорної тепловикористальної холодильної машини

компоненті. Особливий випадок являє компонент, в якому продуктом є потік ексергії, спрямований до зовнішнього джерела (корисний ефект всієї системи);

- «Деструкція ексергії» (руйнування ексергії) - внутрішні необоротні втрати в компоненті, пов'язані з теплообміном при кінцевій різниці температур і з рухом потоків з тертям ($E_{Д}$);

«Втрати ексергії» обумовлені взаємодією компонентів з навколишнім середовищем (теплообмін за відсутності термічної рівноваги між середовищем і зовнішньою поверхнею компонента), тобто передача ексергії в навколишнє середовище. При відсутності інформації про конкретну конструкцію моделі компонента, втрати ексергії в ньому приймаються рівними нулю.

У процесі аналізу поетапно визначені показники:

- абсолютна деструкція ексергії в компоненті $E_{Ді} = E_{Пі} - E_{ПРі}, \text{кВт}$
- відносна деструкція ексергії в компоненті $u_{Ді} = E_{Ді} / E_{Пі}$,
- ексергетична ефективність компонента $\eta_{екі} = E_{ПРі} / E_{Пі}$,
- абсолютна деструкція ексергії в машині в цілому $E_{ДМ} = \sum E_{Ді}, \text{кВт}$
- ексергетична ефективність машини в цілому $\eta_{ЕМ} = E_{ПРМ} / E_{ПМ}$.

Система, в якій продукт компонента А є паливом компонента В, надана на рис.5.

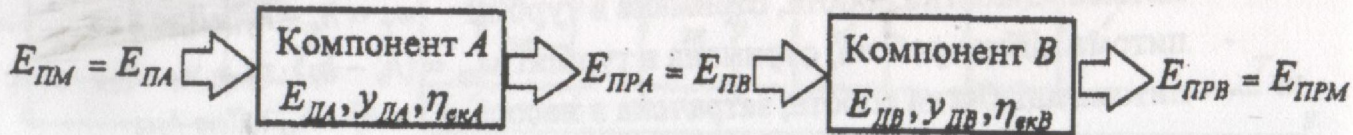
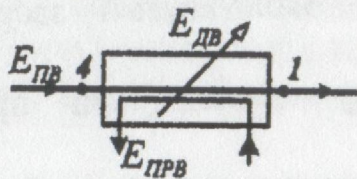


Рис.5

Ексергетичний аналіз компонентів машини виконано в такій послідовності:

Випарник



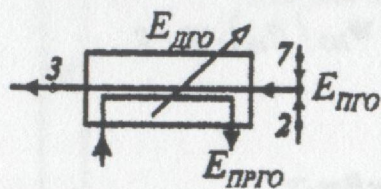
$$E_{ПВ} = M_{азв} \cdot (e_1 - e_4), \text{кВт}$$

$$E_{ПРВ} = E_{ПРМ} = -1 \cdot Q_0 \cdot (1 - T_{СР} / T_{ХН}), \text{кВт}$$

$$E_{ДВ} = E_{ПВ} - E_{ПРВ}, \text{кВт}$$

$$\eta_{ЕВ} = E_{ПРВ} / E_{ПВ}$$

Газовий охолоджувач



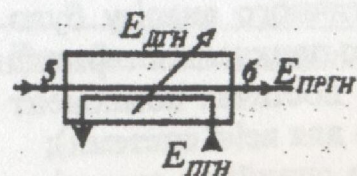
$$E_{ПГО} = M_{азв} \cdot (e_2 - e_3) + M_{апр} \cdot (e_7 - e_3), \text{кВт}$$

$$E_{ПРГО} = Q_{ГО} \cdot (1 - T_{СР} / T_{ТН}), \text{кВт}$$

$$E_{ДГО} = E_{ПГО} - E_{ПРГО}, \text{кВт}$$

$$\eta_{ЕГО} = E_{ПРГО} / E_{ПГО}$$

Газовий нагрівач



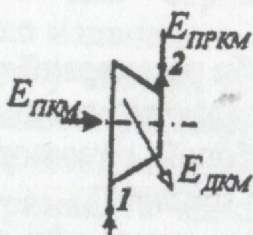
$$E_{ПГН} = E_{ПМ} = Q_{ГН} \cdot (1 - T_{СР} / T_{ДТ}), \text{кВт}$$

$$E_{ПРГН} = M_{апр} \cdot (e_6 - e_3), \text{кВт}$$

$$E_{ДГН} = E_{ПГН} - E_{ПРГН}, \text{кВт}$$

$$\eta_{ЕГН} = E_{ПРГН} / E_{ПГН}$$

Компресор



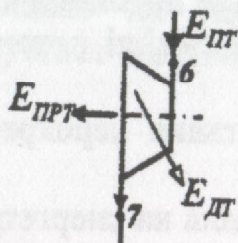
$$E_{ПРКМ} = M_{азв} \cdot (e_2 - e_1), \text{ кВт}$$

$$E_{ДКМ} = E_{ПКМ} - E_{ПРКМ}, \text{ кВт}$$

$$E_{ПКМ} = M_{азв} \cdot (h_2 - h_1), \text{ кВт}$$

$$\eta_{ЕКМ} = E_{ПРКМ} / E_{ПКМ}$$

Турбіна



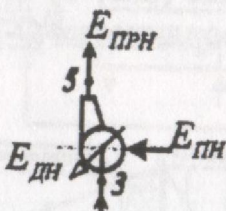
$$E_{ПТ} = M_{апр} \cdot (e_6 - e_7), \text{ кВт}$$

$$E_{ПРТ} = M_{апр} \cdot (h_6 - h_7), \text{ кВт}$$

$$E_{ДТ} = E_{ПТ} - E_{ПРТ}, \text{ кВт}$$

$$\eta_{ЕТ} = E_{ПРТ} / E_{ПТ}$$

Насос



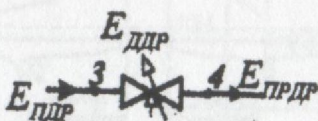
$$E_{ПН} = M_{апр} \cdot (h_5 - h_3), \text{ кВт}$$

$$E_{ПРН} = M_{апр} \cdot (e_5 - e_3), \text{ кВт}$$

$$E_{ДН} = E_{ПН} - E_{ПРН}, \text{ кВт}$$

$$\eta_{ЕН} = E_{ПРН} / E_{ПН}$$

Дросельний вентиль



$$E_{ПДР} = M_{азв} \cdot (e_{m3} - e_{m4}), \text{ кВт}$$

$$E_{ПРДР} = M_{азв} \cdot (e_{i2} - e_{i1}), \text{ кВт}$$

$$E_{ДДР} = E_{ПДР} - E_{ПРДР}, \text{ кВт}$$

$$\eta_{ЕДР} = E_{ПРДР} / E_{ПДР}$$

$$\eta_{КМ} = E_{ПРМ} / E_{ПМ}$$

Ексергетична ефективність машини

Деструкція ексергії в машині в цілому

$$E_{ДМ} = E_{ДТ} + E_{ДГН} + E_{ДН} + E_{ДДР} + E_{ДГО} + E_{ДКМ} + E_{ДВ}, \text{ кВт}$$

Доля деструкції ексергії в елементах машини:

- газований охолоджувач $u_{ДГО} = E_{ДГО} / E_{ПРМ},$
- газований нагрівач $u_{ДГН} = E_{ДГН} / E_{ПРМ},$
- випарник $u_{ДВ} = E_{ДВ} / E_{ПРМ},$
- турбіна $u_{ДТ} = E_{ДТ} / E_{ПРМ},$
- компресор $u_{ДКМ} = E_{ДКМ} / E_{ПРМ},$
- насос $u_{ДН} = E_{ДН} / E_{ПРМ},$
- дросельний вентиль $u_{ДДР} = E_{ДДР} / E_{ПРМ},$

В третьому розділі розглянуто вплив регенерації тепла в компресорній тепловикористальній холодильній машині на підвищення енергетичної ефективності.

Було запропоновано для аналізу чотири способи регенерації тепла:

Перший ($PТO_1$) – регенерація тепла в зворотному циклі між потоками холодної пари після випарника і теплої робочої речовини після газового охолодження (класичний $PТO$ парової холодильної машини).

Другий ($PТO_2$) – регенерація тепла в прямому циклі між потоками холодної робочої речовини після насоса та гарячої – після турбіни.

Третій ($PТO_3$) – перехресна регенерація тепла між потоками в циклах – потоком холодної робочої речовини після насоса та гарячої суміші потоків після турбіни і компресора.

Четвертий ($PТO_1, PТO_2$) – одночасне використання перехресної регенерації і $PТO$ зворотного циклу (рис.6).

Термодинамічний аналіз впливу регенерації тепла на енергетичну досконалість циклу проведено для всіх схемних рішень. В рефераті наведено результати аналізу на прикладі порівняння четвертого схемного рішення (рис. 6) з простим (рис. 4.). Результати порівняння в графічній формі надано в координатах $Q-T$ (рис.7)

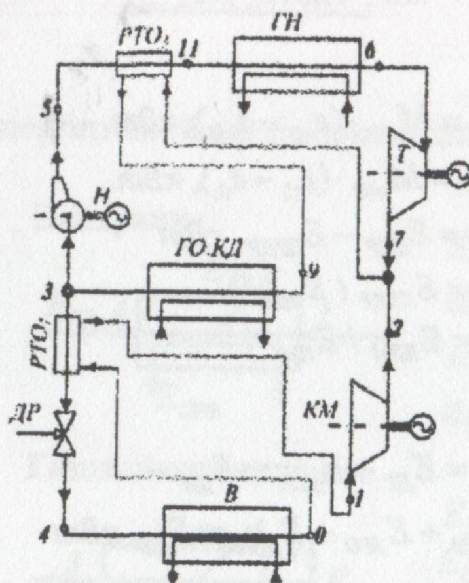


Рис. 6. Схема машини четвертого типу.

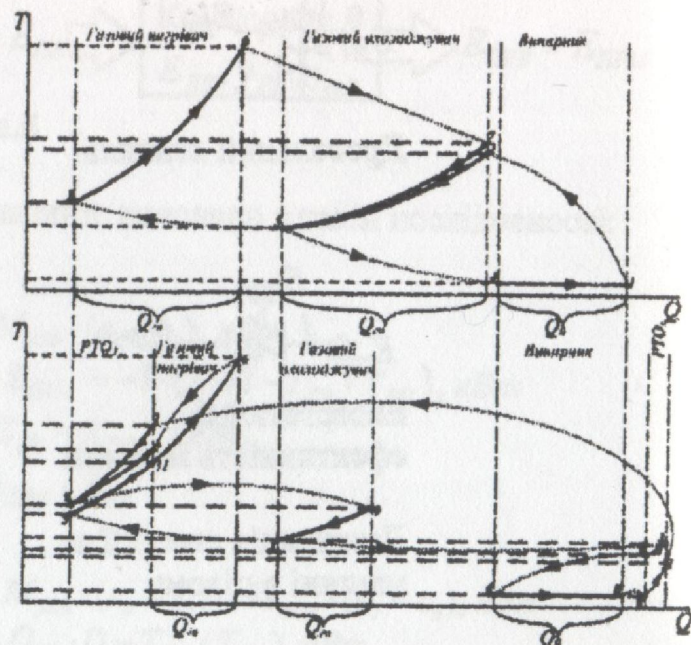


Рис. 7. Порівняльний аналіз

Порівняння термодинамічної ефективності всіх схемно-циклових рішень виконано під час числового моделювання в розділі 5.

У четвертому розділі розглянуто системи тригенерації тепла на базі тепловикористальної компресорної холодильної машини з $R744$ з утилізацією бросового тепла різного температурного потенціалу.

Сучасні системи тригенерації містять базову енергетичну установку з котлом-утилізатором для отримання тепла та абсорбційною тепловикористальною холодильною машиною.

В роботі у системі тригенерації абсорбційну машину замінено компресорною. Заміна дозволила розширити температурний інтервал роботи котла-утилізатора до 300...500°C, температурний інтервал отриманого тепла до 200°C та температурний інтервал отриманого холоду до -30°C з відповідним підвищенням ефективності всієї системи.

Схемно-циклове рішення системи тригенерації як самостійної автономної системи надано на рис.8 і 9. Система працює з гріючим джерелом, яке використовується на рівні температур 300...500°C.

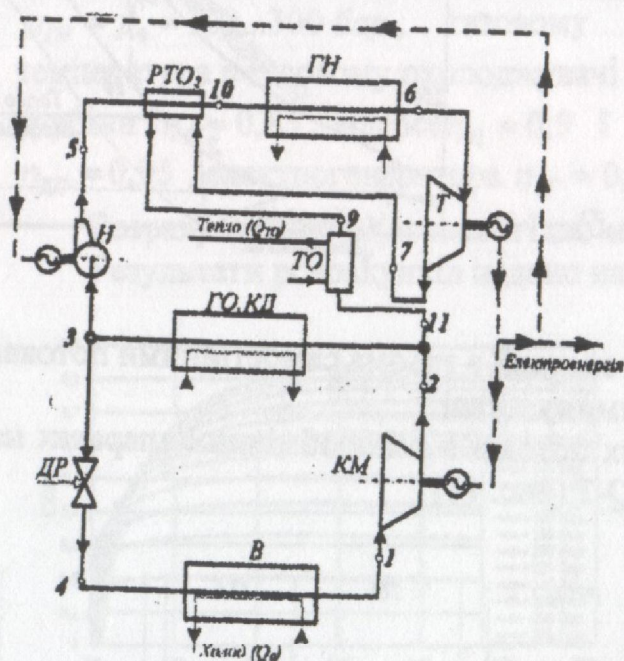


Рис. 8. Схеми автономної системи тригенерації

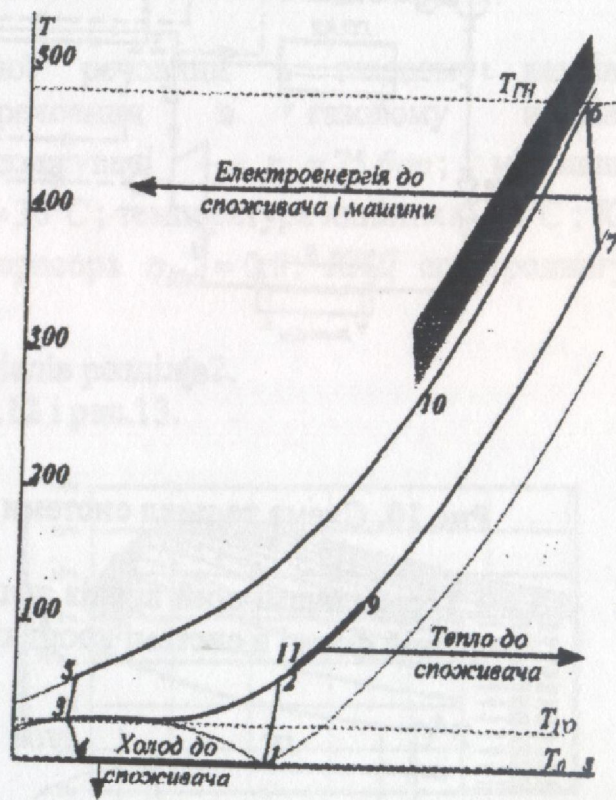


Рис. 9. Цикл системи тригенерації

Термодинамічний аналіз циклу (рис. 9) з використанням мінімального температурного рівня гріючого джерела в 300°C довів, що гріюче джерело повністю не використовує свій потенціал для нагрівання робочої речовини у газовому нагрівачі. Це пов'язано з тим, що робоча речовина потрапляє в газовий нагрівач після P_{TO_2} з температурою 200...400°C (точка 10 рис. 9). Таке використання гріючого джерела не відповідає екологічній безпеці.

Для підвищення енергетичної ефективності і екологічної безпеки системи тригенерації, яка розглядається, запропоновано ускладнити схему шляхом розподілення загального потоку робочої речовини після насоса на самостійні. У якості прикладу на рис. 10 надано схему з трьома потоками. Перший – повністю нагрівається в газовому нагрівачі від мінімальної до максимальної температури для

даного циклу (процес 5-6); другий – нагрівається в $PТO_1$ (процес 5-12); третій – нагрівається в $PТO_2$ (процес 5-14). Кожний з потоків після нагрівання розширюється у відповідній турбіні. Тепло як корисний ефект ($70...100^{\circ}C$) відводиться в процесі 15-9.

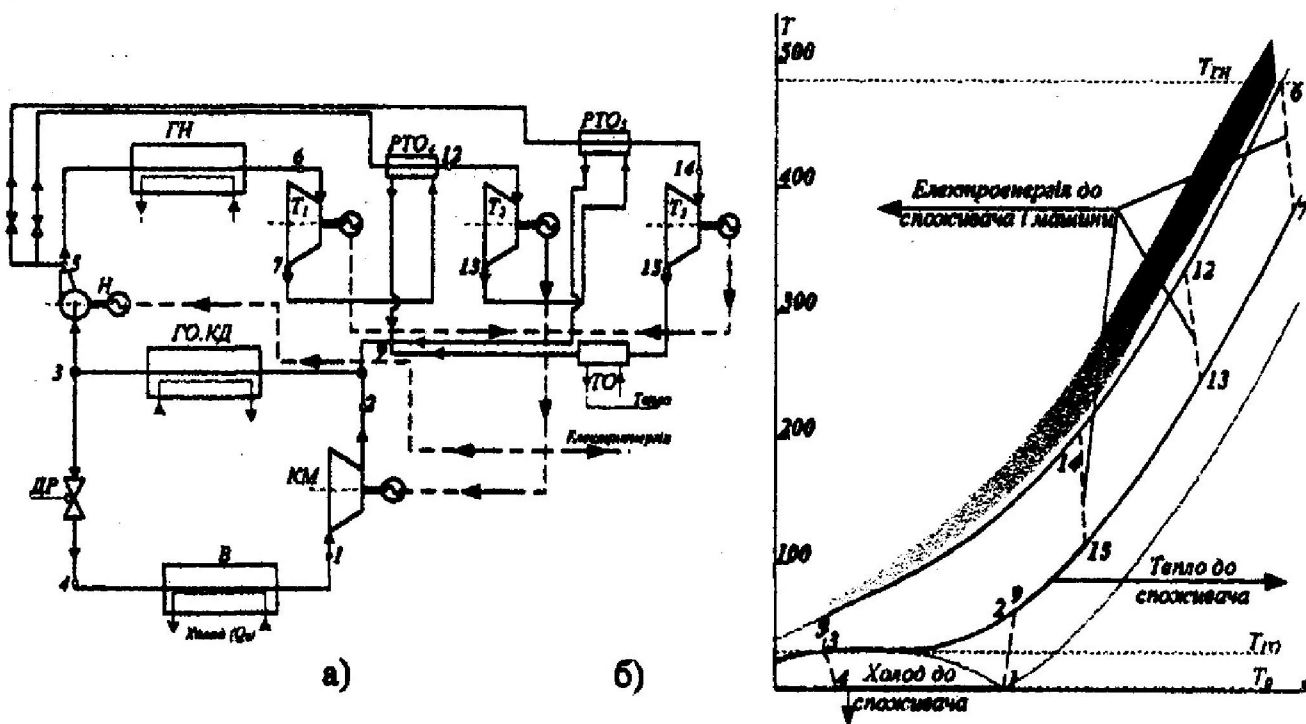


Рис.10. Схема та цикл системи тригенерації з трьома самостійними потоками в прямому циклі

Термодинамічний аналіз теплових потоків в теплообмінних апаратах надано в графічній формі в системі координат $Q-T$ (рис. 11)

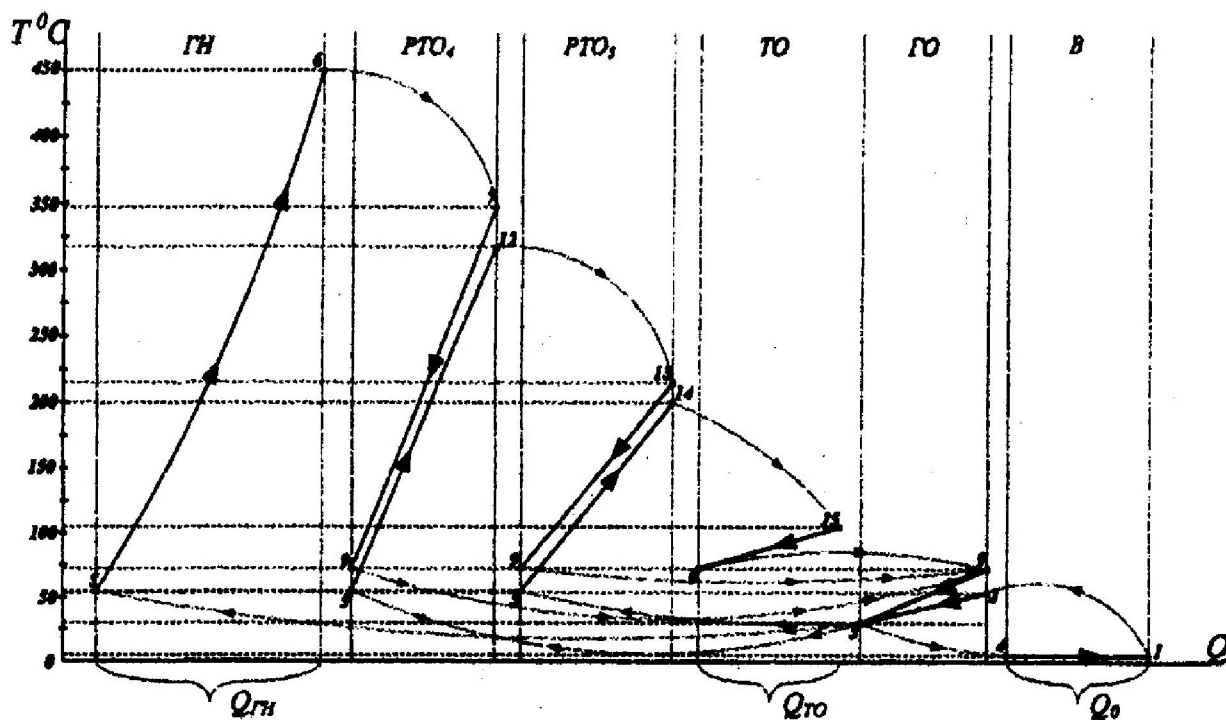


Рис. 11. Теплові потоки в системі тригенерації

Аналогічний аналіз здійснено для схемно-циклового рішення з двома самостійним потоками (PTO, замінено додатковим газовим нагрівачем).

Дійсну енергетичну ефективність схемно-циклового рішення системи тригенерації, яку розглянуто, встановлюють з використанням ексергоекономічного аналізу. В роботі такий аналіз не можливий за відсутності економічних показників різного типу (конструктивних рішень обладнання і його вартості, монтажних робіт, системи моніторингу та ін..).

В п'ятому розділі виконано числове математичне моделювання енергетичного та ексергетичного аналізу створених схемно-циклових рішень.

Задача 1.

Енергетичний і ексергетичний аналіз тепловикористальної компресорної холодильної машини (рис. 4)

Вихідні параметри:

максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі $t_{ГН} = 90...700^{\circ}\text{C}$; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі $p_{ГН} = p_6 = 100...300 \text{ бар}$, газовому охолоджувачі – $p_1 = 75 \text{ бар}$; мінімальна температура в газовому охолоджувачі – $t_3 = 30^{\circ}\text{C}$; температура кипіння $t_0 = 5^{\circ}\text{C}$; ККД турбіни $\eta_T = 0,85$, насоса $\eta_H = 0,9$ і компресора $\eta_{KM} = 0,8$; ККД електродвигуна $\eta_{ED} = 0,95$, електрогенератора $\eta_{EG} = 0,95$.

Розрахунки виконуються згідно матеріалів розділу 2.

Результати розрахунків надано на рис.12 і рис.13.

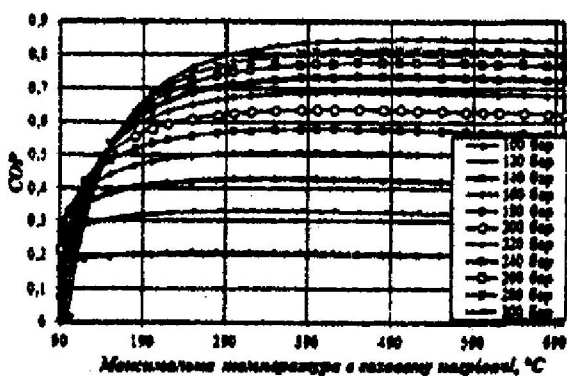


Рис. 12. Залежність COP від $t_{ГН}$

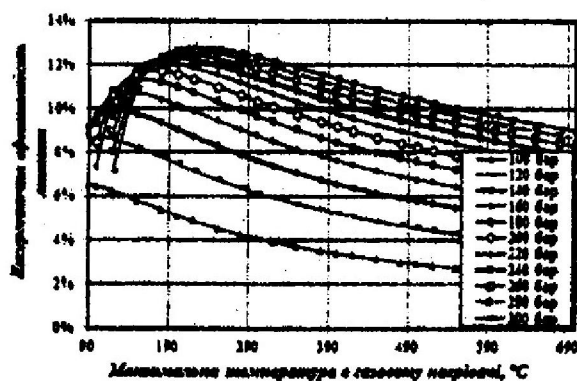


Рис. 13. Залежність $\eta_{екм}$ від $t_{ГН}$

- COP циклу залежить від тиску та температури робочої речовини в газовому нагрівачі. При збільшенні температури та тиску COP циклу збільшується і досягає свого максимального значення 0,7...0,84 за температури 250...450 $^{\circ}\text{C}$ і тиску в інтервалі 240...300бар;

- ексергетична ефективність $\eta_{екм}$ залежить від тиску та температури робочої речовини в газовому нагрівачі і досягає максимального значення 12,8% за температури 230 $^{\circ}\text{C}$ та тиску 300бар;

Задача 2

Порівняння енергетичної та ексергетичної ефективності схемно-циклових рішень з регенерацією тепла.

Вихідні параметри:

температура кипіння – $t_4 = -25^\circ\text{C}$, мінімальна температура в газовому охолоджувачі – $t_3 = 30^\circ\text{C}$, максимальна температура в газовому нагрівачі – $t_6 = 220^\circ\text{C}$, тиск робочої речовини в газовому охолоджувачі – $p_3 = 75\text{ бар}$ та в газовому нагрівачі – $p_6 = 200\text{ бар}$.

Розрахунки виконуються згідно матеріалів розділів 2 і 3
Результати розрахунків надано на рис.14 і рис. 15

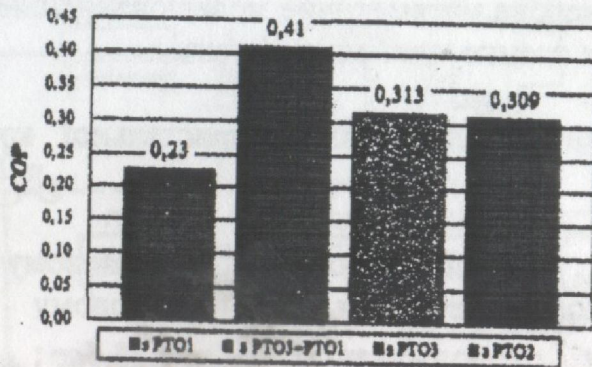


Рис.14. Енергетична ефективність

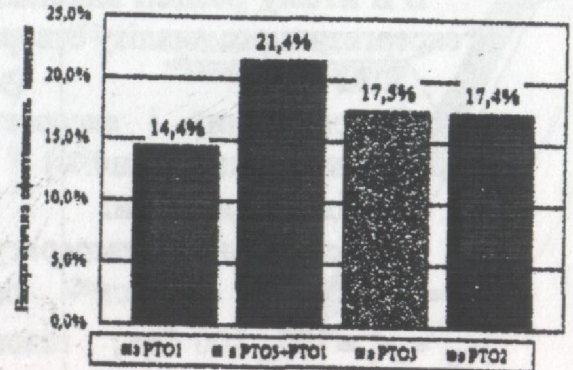


Рис. 15. Ексергетична ефективність

Найвищу енергетичну і ексергетичну ефективність має схемно-циклове рішення з одночасним використанням перехресної регенерації (PTO_3 і PTO_1) зворотного циклу (рис.6).

Задача 3.

Визначення величини корисних ефектів (електроенергії, тепла і холоду), та ексергетичний аналіз системи тригенерації на базі тепловикористальної компресорної холодильної машини (рис.8).

Вихідні параметри:

максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі $t_{ГН} = 90...700^\circ\text{C}$; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі $p_{ГН} = p_6 = 100...300\text{ бар}$, газовому охолоджувачі – $p_3 = 75\text{ бар}$; мінімальна температура в газовому охолоджувачі – $t_3 = 30^\circ\text{C}$; температура кипіння $t_0 = 5^\circ\text{C}$; ККД турбіни $\eta_T = 0,85$, насоса $\eta_H = 0,9$ і компресора $\eta_{KM} = 0,8$; ККД електродвигуна $\eta_{ED} = 0,95$, електрогенератора $\eta_{EG} = 0,95$. Теплова потужність гріючого джерела $Q_{ГН} = 100\text{ кВт}$.

Розрахунки виконуються згідно матеріалів розділів 2,3,4.

Результати розрахунків надано на рис.16-19.

В режимі $t_{ГН} = 300^\circ\text{C}$, $p_{ГН} = 300\text{ бар}$ холодопродуктивність $Q_0 = 46\text{ кВт}$, тепло до споживача $Q_{ТО} = 21,5\text{ кВт}$ і електроенергія до споживача $W_e = 12,5\text{ кВт}$; в режимі $t_{ГН} = 190^\circ\text{C}$, $p_{ГН} = 100\text{ бар}$: $Q_0 = 12\text{ кВт}$, $Q_{ТО} = 28\text{ кВт}$ і $W_e = 3\text{ кВт}$. В режимі $Q_0 = 0\text{ кВт}$ при $t_{ГН} = 300^\circ\text{C}$, $p_{ГН} = 300\text{ бар}$: $Q_{ТО} = 21,5\text{ кВт}$, $W_e = 25\text{ кВт}$. Таким чином співвідношення корисних ефектів визначає споживач.

Ексергетична ефективність в режимі $t_{ГН} = 300^\circ\text{C}$, $p_{ГН} = 300\text{ бар}$ складає $\eta_{ек} = 44\%$.

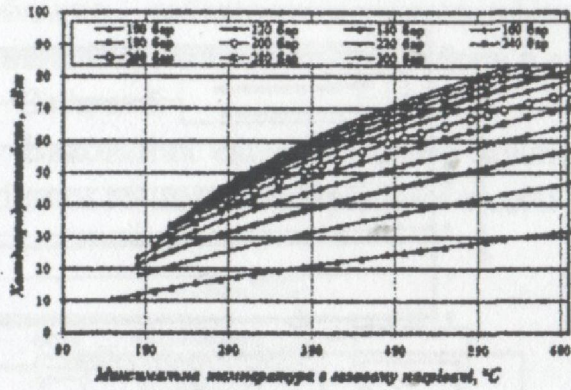


Рис.16. Залежність Q_0 від t_{GH}

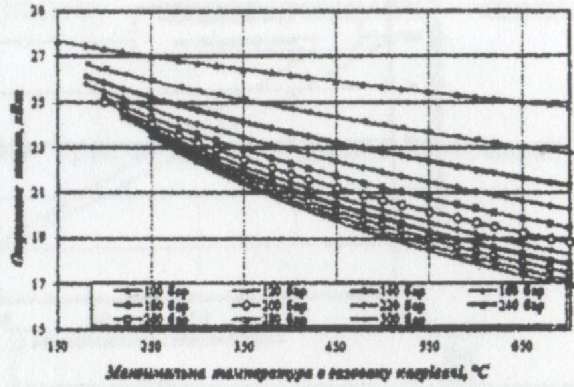


Рис.17. Залежність Q_{TO} від t_{GH}

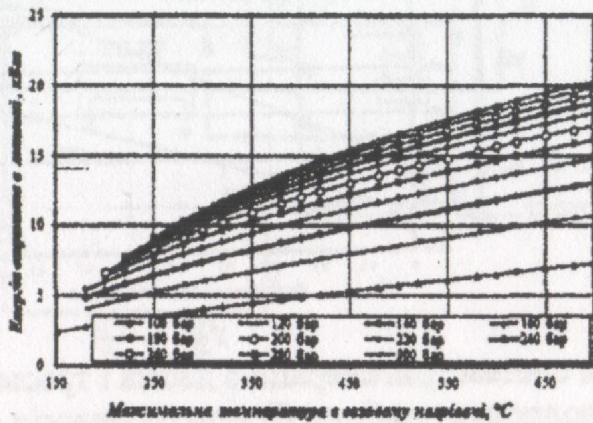


Рис.18. Залежність W_e від t_{GH}

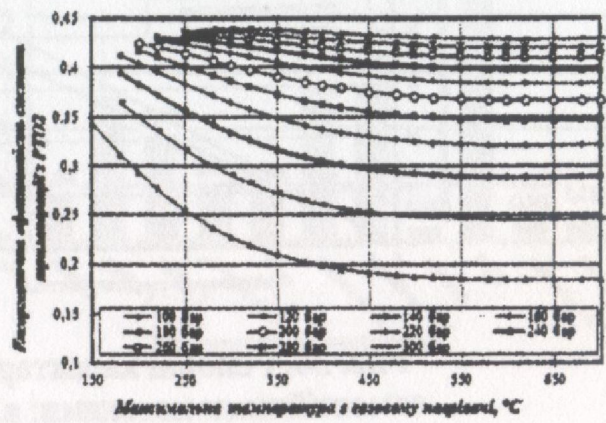


Рис.19. Залежність $\eta_{ек}$ від t_{GH}

Задача 4.

Порівняння енергетичної та ексергетичної ефективності схемно-циклових рішень системи тригенерації з розподіленням загального потоку робочої речовини після насоса на два (рис.22) і три самостійні (рис. 10).

Вихідні параметри:

максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі $t_{GH} = 450^{\circ}C$; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі $p_{GH} = 220 \text{ бар}$, газовому охолоджувачі – 75 бар; мінімальна температура в газовому охолоджувачі – $t_3 = 30^{\circ}C$; температура кипіння $t_0 = 5^{\circ}C$; ККД турбіни $\eta_T = 0,85$, насоса $\eta_H = 0,9$ і компресора $\eta_{KM} = 0,8$; ККД електродвигуна $\eta_{ед} = 0,95$, електрогенератора $\eta_{ег} = 0,95$. Теплова потужність гріючого джерела $Q_{GH} = 100 \text{ кВт}$.

Розрахунки виконуються згідно матеріалів розділів 2,3,4.

Результати розрахунків надано на рис.20.

Тепло для споживача є незалежною характеристикою систем, і встановлюється в залежності від температурного рівня (рис. 20б), інші корисні ефекти взаємозалежні. Системі з трьома потоками характеризується більшою продуктивністю двох корисних ефектів (електроенергія і холод) у порівнянні з двома потоковою (рис. 20а і в)

З ексергетичної точки зору найбільш досконалою є схема з двома потоками (рис.20 г)

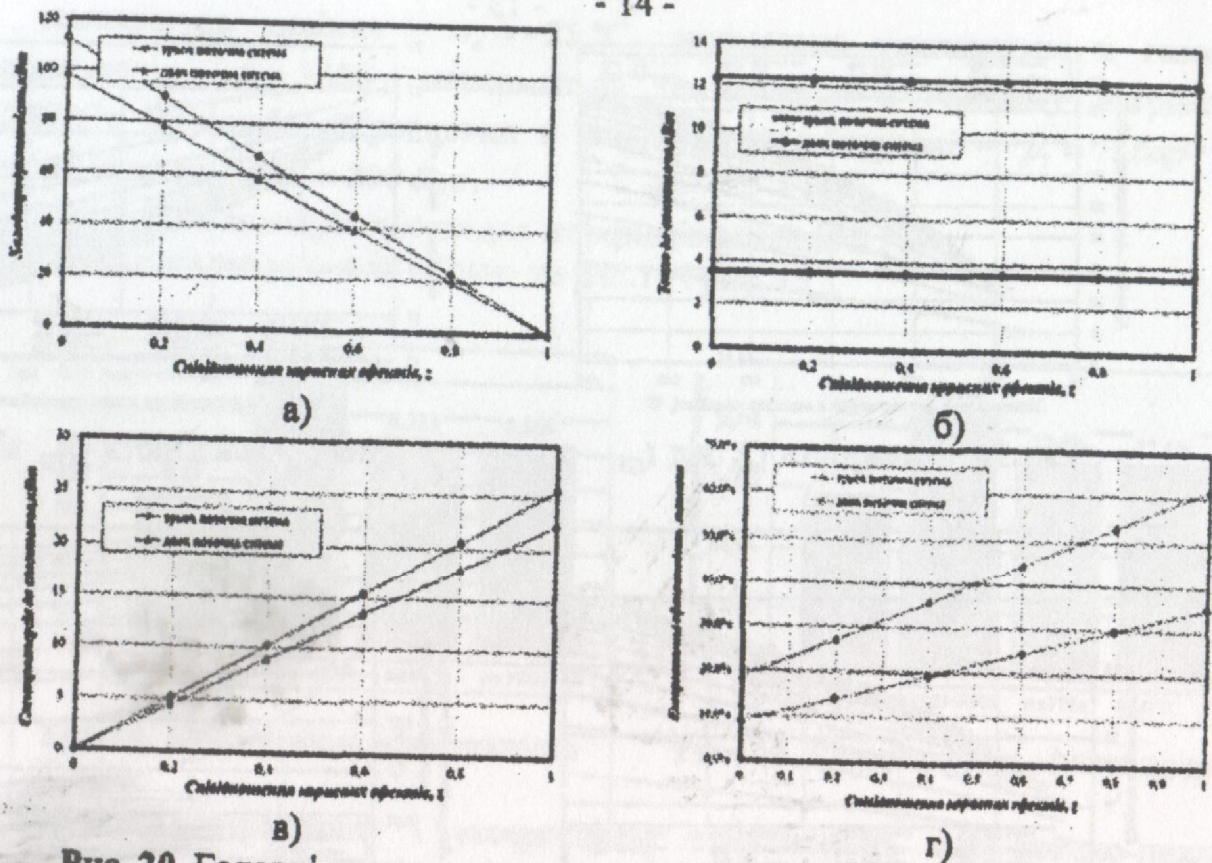


Рис. 20. Головні характеристики систем тригенерації з двома і трьома самостійними потоками: а) холодопродуктивність; б) електроенергія до споживача; в) тепло до споживача; г) ексергетична ефективність системи в залежності від співвідношення двох корисних ефектів (електроенергії і холоду) *Задача 5.*

Виконання ексергетичного аналізу системи тригенерації з трьома потоками за вихідним даними і матеріалами задачі 4.

Деструкція ексергії визначена для кожного елемента системи. Оцінку ефективності кожного елемента надано по відношенню його деструкції ексергії до ексергії палива всієї системи (рис. 21).

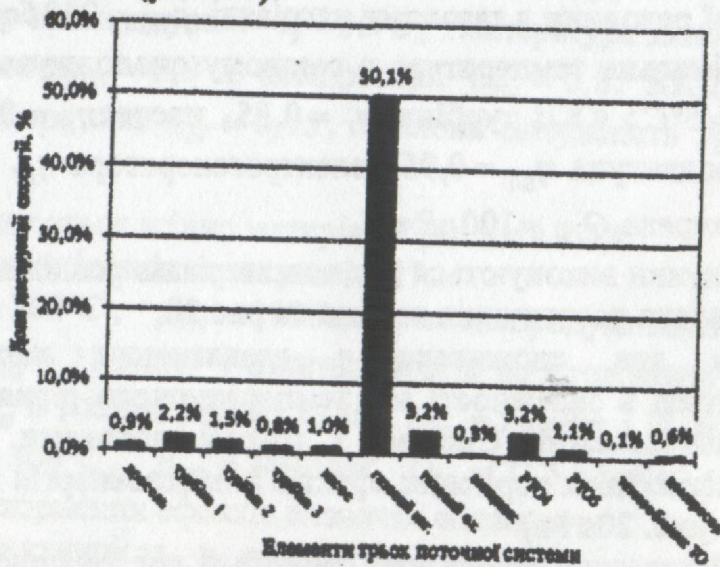


Рис.21. Ексергетичний аналіз системи тригенерації з трьома потоками. Результати свідчать, що найбільший вплив на ексергетичну ефективність системи має деструкція ексергії в газовому нагрівачі, тому під час проектування

необхідно забезпечити інтенсифікацію процесу теплопередавання шляхом зменшення температурного напору в елементі.

Задача 6.

Виконання ексергетичного аналізу системи тригенерації з двома потоками за вихідним даними і матеріалами задачі 4.

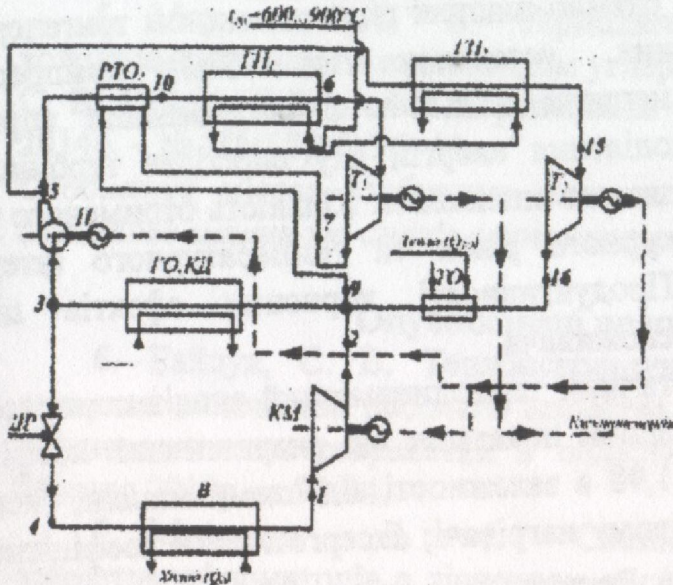


Рис. 22. Схема системи тригенерації з двома потоками

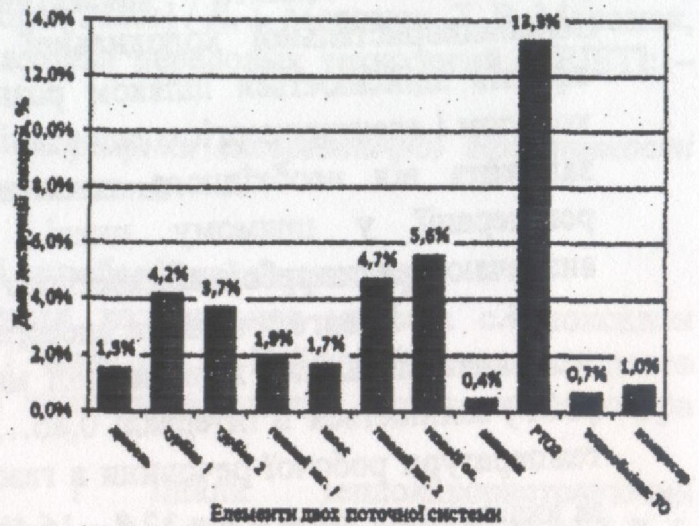


Рис. 23. Ексергетичний аналіз системи тригенерації з двома потоками

Результати свідчать (рис.23), що найбільший вплив на ексергетичну ефективність системи має деструкція ексергії в PTO_2 , чотири елементи (турбіна 1, турбіна 2, газовий нагрівач 2 і газовий охолоджувач) мають однаковий вплив, а найменший вплив має випарник.

РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено і теоретично обгрунтовано інструментарій до процесу проектування енергоперетворювальних компресорних тепловикористальних систем з діоксидом вуглецю в якості робочої речовини, який базується на сучасних методах термодинамічного аналізу і формування схемно-циклових рішень, що відповідають завданням енергозбереження.

Відповідно до мети роботи було розв'язано завдання дослідження та здобуто такі результати:

1. Вперше розроблено схемно-циклове рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини, в якій первиною енергією є бросове тепло енергетичних установок з широким діапазоном температур 100...700 °С. Відмітною особливістю циклового рішення є здійснення прямого циклу в надкритичній області а зворотного у двофазній. Формування схемного рішення виконувалося з використанням термодинамічного аналізу методом циклів, що забезпечує одночасне вирішення питань енергозбереження.

2. Регенерація тепла у компресорній тепловикористальній холодильній машині забезпечує підвищення енергетичної ефективності в межах 1,4..2,5 раз, за умови її здійснення у прямому циклі між потоками «після турбіни – після насосу»; при перехресній моделі – «загальний потік після турбіни і компресора – потік після насосу»; при одночасному використанні перехресної моделі і регенеративного теплообміну у зворотному циклі.

3. Вперше розроблено нові схемно-циклові рішення систем тригенерації з утилізацією теплоти енергетичних установок на базі компресорної тепловикористальної холодильної машини з R744. Співвідношення корисних ефектів здійснюється шляхом розподілення енергії, яку виробляє турбіна, між холодом і електроенергією для зовнішнього споживача. Кількість отриманого тепла залежить від необхідного температурного рівня та температурного інтервалу регенерації у прямому циклі. Продуктивності корисних ефектів цілком визначаються потребою конкретного споживача.

4. Енергетичний та ексергетичний термодинамічний аналіз компресорної тепловикористальної холодильної машини показали, що енергетичний коефіцієнт (COP) змінюється в інтервалі 0,85...1,98 в залежності від схеми машин, тиску та температури робочої речовини в газовому нагрівачі; ексергетичний коефіцієнт $\eta_{екм}$ за аналогічних умов – від 12,8...16,5%. Верхня межа отриманих значень COP і $\eta_{екм}$ відповідає високим тискам і високим температурам робочої речовини в газовому нагрівачі.

5. Енергетичний аналіз систем тригенерації установив співвідношення продуктивностей корисних ефектів холоду і електроенергії, при постійній величині отриманого тепла за незмінних умов роботи газового нагрівача. За аналогічних умов ексергетичний коефіцієнт $\eta_{екм}$ змінюється в інтервалі 9...62% в залежності від схемного рішення.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Морозюк, Л. І. Можливості створення компресорної тепловикористальної холодильної машини [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук // Холодильная техника и технология. – 2012. – № 4 (138). – С. 17–21.
Особистий внесок здобувача: виконано огляд існуючих холодильних тепловикористальних машин та робочих речовин до них і визначено оптимальні умови роботи машини.
2. Гайдук, С. В. Методи створення схеми тепловикористальної холодильної машини з робочою речовиною діоксидом вуглецю [Текст] / С. В. Гайдук // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 1 (147). – С. 16–23.
3. Морозюк, Л. І. Регенерація теплоти в тепловикористальних холодильних машинах [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук // Обладнання та технологія харчових виробництв: – 2012р. – №. 29, т. 1. – С. 8-16.

Особистий внесок здобувача: виконано варіантні розрахунки, аналіз отриманих результатів

4. Гайдук, С. В. Передумови створення тепловикористальних термотрансформаторів з діоксидом вуглецю в якості робочої речовини [Текст] / С. В. Гайдук // Збірник наукових праць 8-ої міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю Одеської державної академії холоду «Сталий розвиток и штучний холод». – Одеса, 2012. – С.118-123

5. Морозюк, Л. І. Термодинамический анализ теплоиспользующей холодильной машины с диоксидом углерода [Текст] / Л. І. Морозюк, Т. В. Морозюк, С. В. Гайдук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий [ЕЕJET]: – 2014р. – № 2(8(68)) С.36–44.

Особистий внесок здобувача: виконано розрахунки ексергетичної ефективності елементів машин та аналіз отриманих результатів

Опубліковані праці апробаційної характеру:

6. Гайдук, С. В. Теплоиспользующая холодильная машина с диоксидом углерода в качестве рабочего вещества [Текст] / С. В. Гайдук // –Тезисы докладов «Иновационные разработки в области техники и физики низких температур» Москва 2010р., с.92-94.

7. Морозюк, Л. І. Схеми і цикли тепловикористовуючих термотрансформаторів з діоксидом вуглецю як робочою речовиною [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук // –Тези доповідей «Техніка і технологія харчових виробництв». Випуск 6, Донецьк 2011р., с.91-93.

8. Морозюк, Л. І. Термодинамічні зразки для аналізу тепловикористовуючих машин [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук // – Тези доповідей «Стан досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», Одеса, 2011р., с.73

9. Морозюк, Л. І. Особливості реалізації циклу Чистякова-Плотникова з діоксидом вуглецю в якості робочої речовини [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук //Тези доповідей 3-ої міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 75-річчю створення Миколаївської обл. – Миколаїв, 2012р., с.345-347.

10. Морозюк, Л. І. Проблема вибору обладнання для термотрансформаторів з діоксидом вуглецю в якості робочої речовини [Текст] / Л. І. Морозюк, С. В. Гайдук // Тези доповідей «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», 9-ої міжнародної науково-технічна конференції. – Одеса, 2013 – стр. 152-154.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Гайдук, С. В. Теплофікаційна компресорна машина з діоксидом вуглецю в якості робочої речовини [Текст] / С. В. Гайдук, -В.О. Шинкаренко // –Тези доповідей «Стан досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», Одеса, 2012р., с.92

Патенти:

12. А. с. UA №72660, МПК F25B27/00. Компресорна тепловикористальна холодильна машина [Текст] / Морозюк Л. І., Гайдук С. В. // Одеська державна академія холоду. – №u201201563; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. №16. – 4 с

V018626
ОНАХ

АННОТАЦИЯ

Гайдук С.В. Разработка и анализ схемных решений энергопреобразующих систем, работающих с диоксидом углерода. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования воздуха.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – экономии энергетических ресурсов путем утилизации бросовых источников тепла энергетических установок и технологических процессов промышленных предприятий с различными температурными уровнями.

Для холодильной техники как энергоемкой отрасли хозяйства любой страны перспективно совершенствование теплоиспользующих машин с расширением возможности утилизации тепла в совокупности с созданием новых схемно-цикловых решений, что способствует уменьшению ее энергетической зависимости.

В классификационную группу энергопреобразующих теплоиспользующих машин входят пароконпрессорные с приводом от турбины, работающей на едином рабочем веществе с холодильной машиной.

Развитие исследований компрессорных теплоиспользующих машин связано с использованием современных рабочих веществ, разрешенных к эксплуатации в холодильной технике. При решении задач энергосбережения и экологической безопасности направление исследований является актуальным.

Разработаны схемно-цикловые решения компрессорной теплоиспользующей холодильной машины с диоксидом углерода (R744) в качестве рабочего вещества, в которых первичной энергией является бросовое тепло энергетических установок. Использование современных методов термодинамического анализа, при формировании схемы и цикла обеспечило одновременное решение вопросов энергосбережения.

Разработаны новые схемно-цикловые решения систем тригенерации с утилизацией тепла энергетических установок на базе компрессорной теплоиспользующей холодильной машины с R744. Соотношение производительностей полезных эффектов осуществляется путем перераспределения энергии, вырабатываемой турбиной, между холодом и электроэнергией для внешнего потребителя, а тепла – в зависимости от необходимого температурного уровня путем изменения температурного интервала регенерации в прямом цикле.

Получили развитие методы оценки энергетической и эксергетической эффективности теплоиспользующей машины с R744 и систем тригенерации на ее основе. Доказано, что энергетическая (эксергетическая) эффективность зависит от сочетания схемы машины и параметров рабочего вещества (давления и температуры) в газовом нагревателе, а ее значения определяются температурным уровнем утилизируемого бросового тепла. Эксергетический анализ определил влияние необратимых потерь в каждом элементе на общую эффективность системы, выявил наиболее проблемные элементы, на которые следует обратить внимание в процессе проектирования рассматриваемой энергопреобразующей системы.

2023101
ХАНО

Ключевые слова: термодинамический анализ, эксергетический анализ, диоксид углерода, теплоиспользующая компрессорная холодильная машина, система тригенерации.

АНОТАЦІЯ

Гайдук С.В. Розроблення та аналіз схемних рішень енергоперетворювальних систем, що працюють з діоксидом вуглецю. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування повітря.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми – економії енергетичних ресурсів шляхом утилізації бросових джерел тепла енергетичних установок та технологічних процесів промислових підприємств з різними температурними рівнями.

Розроблено схемно-циклове рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини з діоксидом вуглецю у якості робочої речовини, в якій первинною енергією є бросове тепло енергетичних установок. Використання сучасних методів термодинамічного аналізу при формуванні схеми і циклу забезпечило одночасне вирішення питань енергозбереження.

Розроблено нові схемно-циклові рішення систем тригенератії на базі компресорної тепловикористальної холодильної машини з R744, в яких співвідношення продуктивностей корисних ефектів (холоду, електроенергії та тепла) регулюється шляхом перерозподілення роботи турбіни.

Отримали розвиток методи оцінення енергетичної (ексергетичної) ефективності тепловикористальної машини з R744 і систем тригенератії на її основі. Доведено, що енергетична ефективність залежить від поєднання схеми машини та параметрів робочої речовини (тиску і температури) в газовому нагрівачі, а її значення визначає температурний рівень утилізованого бросового тепла. Ексергетичний аналіз визначив вплив необоротних втрат в кожному елементі на загальну ефективність системи, виявив найбільш проблемні елементи, на які слід звернути увагу в процесі проектування енергоперетворювальної системи, яка розглядається.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, ексергетична ефективність, ексергія, паливо, продукт, деструкція, діоксид вуглецю, тепловикористальна компресорна холодильна машина, система тригенератії.

ABSTRACT

Gayduk S.V. Development and evaluation of schematics of the energy conversion system working with carbon dioxide. – Manuscript.

Dissertation for the degree of the candidate of engineering sciences, specialty 05.10.14 – «Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems». – Odessa national academy of food technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2014.

The dissertation is devoted in solving a relevant scientific and technical problem. This problem is economy of the energy resources through utilization of the exhausted heat

at different temperature levels from the energy systems as well as from the different technological processes.

For the refrigeration, as an intensive energy-consumption area for any of countries, the perspective improvement of the heat using refrigeration machines (with extended possibilities for heat utilization in conjunction with development of novel schematics and thermodynamic cycles) lead to decrease in the energetic dependence of the country.

Vapor-compression machines driven by turbine with the common working fluids are included in the classification group of the heat using machines.

Research development for the compression heat using refrigeration machines depends on the nomenclature of working fluids permitted for the utilization in refrigeration. The direction of conducted research is actual: solving problems related to energy saving and ecological reliability.

In the dissertation were developed schematics and thermodynamic cycles of the compression heat driven refrigeration machines with carbon dioxide (R744) as a working fluid. The primary energy for these machines is exhausted heat from the energy systems. Application of the modern methods of the thermodynamic analysis let us to solve the problem of energy saving during the process of forming a novel schematic and cycle.

In the dissertation, novel schematics and thermodynamic cycles for the tri-generation systems based on compression refrigeration machine with R 744 were developed. For these tri-generation systems the ratio between the three positive energetic effects (cold, electricity and heat) can be regulated. It can be achieved through the manipulation of the amount of work generated within turbine: (a) between cold and electrical energy for the external customer, and (b) heat (depends on the temperature level) through extension of the regeneration zone within a direct thermodynamic cycle.

In the dissertation, the methods for the evaluation of the energy and exergy efficiencies of the heat driven R744 machine as well as tri-generation machine were applied and extended. It is proven that the energy (exergy) efficiency depends on the combination of the schematics of the machine and operation conditions (pressure and temperature) of the heat heater. High values of the energy efficiency depend on the temperature level of the used exhausted heat from the energy system. Exergy analysis showed (a) the influence of irreversibilities within each component on the efficiency of the overall system, and (b) critical components that should be under attention during the design of the energy conversion system being considered.

Key words: thermodynamic analysis, exergy analysis, carbon dioxide, heat-driven refrigeration machine, tri-generation system