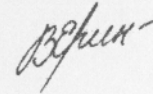


Автореферат
Є71

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЄРІН ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.574

**РОЗРОБКА ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ЕЖЕКТОРНИХ МАШИН
З РАЦІОНАЛЬНИМ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯМ І УТИЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2013

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник –

доктор технічних наук, професор,
Кирилов Володимир Харитонович,
Одеська національна академія харчових
технологій МОН України,
професор кафедри вищої математики

Офіційні опоненти –

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

доктор технічних наук, професор,
Зайцев Олег Миколайович,
Національна академія природоохоронного та
курортного будівництва МОН України,
завідувач кафедри теплогазопостачання і
вентиляції

Захист дисертації відбудеться «09» грудня 2013 р. о 14-00 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.

ознайомитись в бібліотечі Одеської національної академії
адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

2013 р.

Мілованов В.І.

Актуальність теми. В теперішній час у більшості холодильних систем і систем кондиціонування повітря, що експлуатуються в Україні, використовуються парокompресійні холодильні машини (ПКХМ) з механічним приводом, які є активними споживачами електричної енергії. Ефективним напрямком в енергозбереженні, який дозволяє зменшити споживання електроенергії, є застосування тепловикористальних холодильних машин, що утилізують скидну теплоту, вторинні енергетичні ресурси і сонячну енергію, зокрема – ежекторних холодильних машин (ЕХМ), що працюють на низькокиплячих речовинах.

Проведені в Україні і за кордоном обширні дослідження ЕХМ показали високу ефективність таких машин і їх конкурентоспроможність в ряді галузей застосування по відношенню до інших типів холодильних машин, що свідчить про можливість використання ЕХМ в різних системах охолодження і кондиціонування повітря.

Однак, незважаючи на численні роботи, ряд напрямків у створенні холодильних систем на основі ЕХМ залишається недостатньо вивченими з точки зору раціонального енергоспоживання та утилізації тепла. Зокрема, мало уваги приділено питанням створення повністю автономних утилізаційних і сонячних ЕХМ, застосування ЕХМ у складі комбінованих і тригенераційних установок. Крім того, в досліджених раніше ЕХМ застосовувалися робочі речовини R11, R12, R141b, R142b та ін., які не відповідають сучасним екологічним вимогам, і тому подальші роботи повинні бути пов'язані з переходом на альтернативні озононеруйнівні робочі речовини, зокрема на природні.

Таким чином, існує обширна галузь для подальших досліджень холодильних систем на основі ЕХМ з раціональним енергоспоживанням і утилізацією тепла, що відповідають сучасним енергетичним, економічним і екологічним вимогам.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Закону України №74/94-ВР «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р., Законом України №2509-IV «Про комбіноване використання теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного потенціалу» від 05.04.2005 р., Постановою кабінету міністрів України №2274-11 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року» від 22.02.2001 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка холодильних систем на основі ЕХМ, що працюють на природних низькокиплячих холодоагентах, з раціональним енерговикористанням та утилізацією тепла.

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

1. Застосувати існуючі методи термодинамічного аналізу з метою підвищення ефективності циклів пароежекторних холодильних машин (ПЕХМ).
2. Розробити схемно-циклові рішення холодильних систем на основі автономних утилізаційних ЕХМ (УЕХМ).
3. Розробити схемно-циклові рішення холодильних систем геліоежекторних холодильних машин (ГЕХМ).

4. Розробити схемно-циклові рішення комбінованих і каскадних компресійно-ежекторних холодильних машин (КЕХМ).

Об'єктом дослідження є холодильні системи на основі ЕХМ.

Предметом дослідження є термодинамічні процеси в холодильних системах на основі ЕХМ, що працюють на природних низькокиплячих робочих речовинах.

Методи дослідження: термодинамічний аналіз і чисельне моделювання процесів в холодильних системах на основі ЕХМ, порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше встановлено зразковий цикл ПЕХМ, який дозволив визначити гранично можливу ефективність таких машин, і є основою для термодинамічного аналізу теоретичних і дійсних циклів ПЕХМ з метою розробки методів їх вдосконалення шляхом виявлення тих елементів системи, поліпшення яких здатне найбільше вплинути на зростання їх загальної ефективності та надійності.

2. Отримав подальший розвиток метод термодинамічного аналізу ПЕХМ, який дозволяє здійснювати вибір робочих температур, найбільш ефективних робочих речовин, а також перспективних схемно-циклових рішень і напрямів використання ПЕХМ в різних холодильних системах з раціональним енерговикористанням та утилізацією тепла.

3. Вперше проведено теоретичне дослідження впливу досконалості тепловикористального перекачуючого пристрою на характеристики розроблених на основі термодинамічного аналізу схемно-циклових рішень автономних УЕХМ і ГЕХМ, яке довело можливість реалізації таких холодильних систем в широкому діапазоні робочих температур при відносно низьких ККД перекачуючого пристрою (0,2...0,6).

4. Запропоновано схемно-циклові рішення комбінованих КЕХМ, в яких застосування ЕХМ для утилізації теплоти стиснутих парів R744 і використання отриманого в ній холоду для переохолодження робочої речовини після конденсатора або охолоджувача дозволяє підвищити енергетичну ефективність підкритичних (до 60%) і надкритичних (до 50%) вуглекислотних парокомпресійних циклів.

5. Запропоновано схемно-циклові рішення каскадних КЕХМ для тригенераційних систем, в яких застосування ЕХМ у верхніх ступенях каскаду дозволяє забезпечити низькі температури відводу теплоти від стислих парів R744 в нижній ступені (20...25 °С) і як наслідок підвищення енергетичної ефективності вуглекислотних парокомпресійних циклів (до 50%).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і результатів забезпечується коректною постановкою завдання теоретичного дослідження; використанням сучасних методів термодинамічного аналізу, аналітичного і чисельного моделювання; підтвердженням адекватності математичних моделей і хорошим узгодженням експериментальних і розрахункових даних.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Застосування термодинамічного аналізу циклів ПЕХМ дозволило створити роботоспроможні схеми ЕХМ, що використовують природні робочі речовини з

характеристиками, які відповідають сучасним енергетичним, економічним і екологічним вимогам, виробництво яких можливе на вітчизняних підприємствах холодильного машинобудування з використанням існуючих технологій.

2. Розроблені холодильні системи на основі автономних УЕХМ, перспективними галузями раціонального застосування яких є підприємства та виробництва хімічної, металургійної, ливарної, харчової та переробної промисловості, які потребують холодильні машини малої і середньої продуктивності, що мають шкідливі і вторинні енергетичні ресурси.

3. Розроблені холодильні системи на основі ГЕХМ, які найбільш доцільно застосовувати для гарячого водопостачання, тепло- і холодопостачання об'єктів з сезонною потребою в теплоті і холоді, а також у складі автономних енергетичних комплексів, що використовують відновлювані джерела енергії і призначених переважно для енергопостачання об'єктів агропромислового комплексу.

4. Розроблені складні схеми комбінованих і каскадних КЕХМ, які реалізують перспективні методи підвищення ефективності ПКХМ шляхом внутрішньої регенерації теплоти між циклами ПКХМ і ЕХМ, є основою комбінованих і тригенераційних систем і забезпечують в них найбільш ефективне використання енергії.

5. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 7.05060403, 8.05060403 «Холодильні машини і установки» в курсах лекцій «Сучасні тепловикористальні холодильні машини» і в дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану питання, проведенні термодинамічного аналізу ПЕХМ; розробці схемно-циклових рішень холодильних систем на основі ЕХМ, що працюють на низькокиплячих речовинах, з раціональним енерговикористанням та утилізацією тепла, створенні методик і програм розрахунку та моделюванні роботи таких систем на різних природних холодоагентах і режимах роботи; систематизації, обробці та аналізі результатів теоретичного дослідження; формулюванні висновків. Особистий внесок підтверджується науковими публікаціями, в яких подано головні ідеї, положення та результати теоретичного дослідження.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались на: 2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й і 7-й міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, Україна, 2002, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 рр.); 5-й науково-методичної конференції «Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в ВНЗ» (м. Одеса, Україна, 2004 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Промисловий холод і аміак» (м. Одеса, Україна, 2006 р.), міжнародній конференції Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA 2009 (м. Тайпей, Тайвань, 2009 г.), міжнародній конференції Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA 2010 (м. Токіо, Японія, 2010 г.), міжнародній конференції International seminar on ejector/jet-pump technology and application, EURO THERM SEMINAR Nr.85 (г. Брюссель, Бельгія, 2009 г.), міжнародній конференції International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, EuroSun 2010 (м. Грац, Австрія, 2010 г.), міжнародній конференції 23rd

IR International Congress of Refrigeration, (м. Прага, Чехія, 2011 г.), міжнародній конференції ISES Solar World Congress (м. Кассель, Німеччина, 2011 г.), 8-й міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток та штучний холод» (м. Одеса, Україна, 2012р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 12 публікаціях, з яких 5 статей опубліковано у спеціалізованих наукових журналах, затверджених ДАК МОН України, 1 стаття – у спеціалізованому міжнародному науковому журналі, 6 повних текстів доповідей на міжнародних конференціях – у збірниках наукових робіт.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Зміст роботи викладено на 235 сторінках машинописного тексту, включаючи 106 малюнків (51 сторінка), 3 таблиці (1 сторінка) і список літератури з 211 найменувань (24 сторінки). Обсяг додатків становить 11 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі розглянуто сучасний стан питання створення холодильних систем на основі ЕХМ. Проведено огляд вітчизняних і зарубіжних робіт, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням ЕХМ. Представлено критичний аналіз існуючих систем і визначено перспективний напрямок у розвитку холодильних систем на основі ЕХМ – створення автономних утилізаційних і сонячних ЕХМ, що працюють на природних низькокиплячих речовинах. Крім того наведено огляд складних каскадних і комбінованих схем, що складаються з ПКХМ і ЕХМ. У результаті аналізу отриманої інформації сформульовані основні завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі проведено термодинамічний аналіз ПЕХМ «методом циклів». В якості оборотного зразкового циклу використаний складний цикл Карно – Карно тепловикористальної холодильної машини (ТХМ), оскільки процеси підведення і відведення теплоти в прямому і зворотному циклах, що утворюють складний цикл, здійснюються в дійсних ЕХМ в двофазній області. Термодинамічна схема ТХМ представлена на рис. 1.

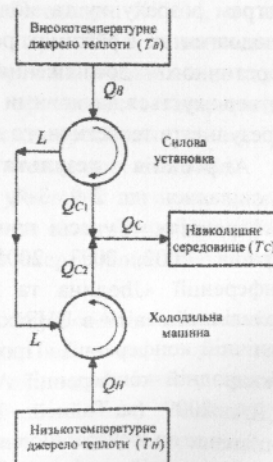


Рис. 1. Термодинамічна схема ТХМ

Тепловий коефіцієнт складного циклу Карно – Карно ζ^K визначається за виразом:

$$\zeta^K = \frac{Q_H}{Q_B} = g^K \cdot \varepsilon^K = \frac{T_B - T_C}{T_B} \cdot \frac{T_H}{T_C - T_H} \quad (1)$$

Аналіз впливу температур T_B , T_C і T_H на значення ζ^K показав, що:

$$\left| \frac{\partial \zeta^K}{\partial T_B} \right| < \left| \frac{\partial \zeta^K}{\partial T_H} \right| < \left| \frac{\partial \zeta^K}{\partial T_C} \right|, \quad (2)$$

тобто найбільший вплив на ζ^K надає зміна температури приймача теплоти T_C . ПЕХМ є окремим випадком ТХМ. Подальший термодинамічний аналіз відповідно до «методом циклів» передбачає врахування термодинамічних властивостей робочих речовин, що відповідає введенню граничних кривих у s, T -діаграмі.

Розглянуто принципову схему ПЕХМ (рис. 2) для якої запропоновані 3 варіанти зразкових циклів (рис. 3).

Залежно від співвідношення значень ентропії у вузлових точках циклу, що відносяться до робочого пару і пару, що ежектуються, в ПЕХМ можуть бути реалізовані такі суміщені оборотні цикли Карно:

- один прямих 1-2-4-5-6 і один зворотний 3-4-7-8 – ентропія пара, що ежектуються, s_e дорівнює ентропії робочого пара s_p ;
- один прямих 1-2'-5-6 і два зворотних 3-4-2'-2 і b -3-4-7-8 – ентропія пара, що ежектуються, s_e більше ентропії робочого пара s_p
- два прямих 1-2'-4-5-6 і 2'-2-3-4 і один зворотний c -3-4-7-8 – коли ентропія пара, що ежектуються, s_e менше ентропії робочого пара s_p .

Доведено, що в якості зразкового циклу для подальшого дослідження циклів ПЕХМ слід прийняти найбільш простий оборотний цикл, що складається з двох суміщених циклів Карно – паросилового та холодильного (рис. 3, а).

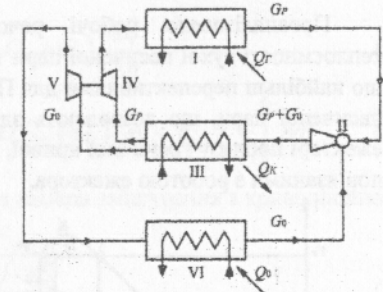


Рис. 2. Принципова схема ПЕХМ
I – генератор; II – ежектор;
III – конденсатор; IV – компресор;
V – детандер; VI – випарник

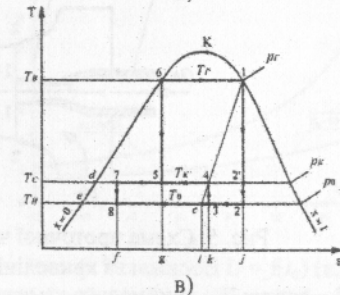
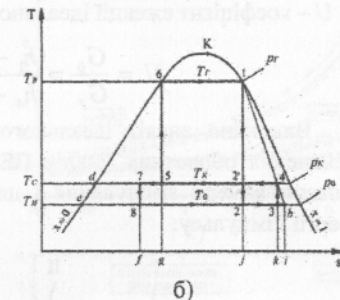
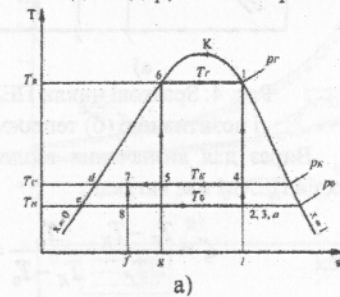


Рис. 3. Зразкові цикли ПЕХМ

Проаналізовано робочі речовини, що мають нульову і позитивну теплоємності сухої насиченої пари та застосовуються в ПЕХМ (рис. 4). Показано, що найбільш перспективними для ПЕХМ є робочі з нульовою теплоємністю сухої насиченої пари, що дозволяють здійснювати процес стиснення і розширення в ежекторі поблизу граничної кривої, тобто з мінімальними незворотними втратами, пов'язаними з роботою ежектора.

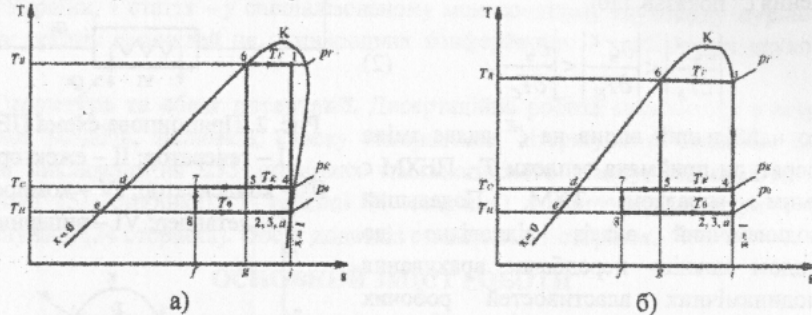


Рис. 4. Зразкові цикли ПЕХМ для робочих речовин з нульовою (а) і позитивною (б) теплоємністю на верхній прикордонній кривій

Вираз для визначення теплового коефіцієнта ζ для розглянутих оборотних циклів ПЕХМ має вигляд:

$$\zeta = \frac{T_r - T_k}{T_r} \cdot \frac{T_0}{T_k - T_0} = g^k \cdot \varepsilon^k = \frac{Q_0}{Q_r} = \frac{G_0 \cdot q_0}{G_p \cdot q_r} = U \frac{h_0 - h_6}{h_1 - h_6} \quad (3)$$

де U – коефіцієнт ежекції ідеального ежектора, що визначається як:

$$U = \frac{G_0}{G_p} = \frac{h_1 - h_2}{h_4 - h_3} - 1 = \frac{l_{PAC}}{l_{CЖ}} - 1 = \frac{h_1 - h_4}{h_4 - h_3} \quad (4)$$

Виконано аналіз ідеального ежектора (рис. 5), що використовується для здійснення оборотних циклів ПЕХМ, та обґрунтований вибір форми проточної частини камери змішування і дифузора на основі рівнянь балансів кінетичної енергії і імпульсу:

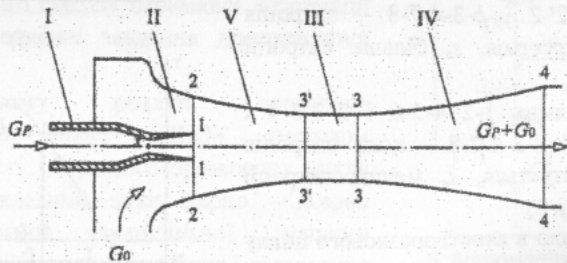


Рис. 5. Схема проточної частини ежектора з камерою змішування з криволінійною входною ділянкою:

I – сопло; II – приймальна камера; III – циліндрична ділянка камери змішування; IV – дифузор; V – криволінійна ділянка камери змішування

$$G_p \cdot \frac{\omega_{p2}^2}{2g} + G_0 \cdot \frac{\omega_{02}^2}{2g} = (G_p + G_0) \cdot \frac{\omega_3^2}{2g}, \quad (5)$$

$$G_p \cdot \omega_{p2} + p_{p2} \cdot f_{p2} + G_0 \cdot \omega_{02} + p_{02} \cdot f_{02} = (G_p + G_0) \cdot \omega_3 + p_3 \cdot f_3 + \int_{f_2}^{f_3} p df \quad (6)$$

Швидкість змішаного потоку на виході з камери змішування з криволінійною входною ділянкою за рівнянням (5) становить:

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{\omega_{p2}^2 + U \cdot \omega_{02}^2}{1 + U}}, \quad (7)$$

за рівнянням (6)

$$\omega_3 = \frac{\omega_{p2} + U \cdot \omega_{02}}{1 + U} + \frac{p_3 \cdot (f_2 - f_3) + \int_{f_2}^{f_3} p df}{G_p \cdot (1 + U)} \quad (8)$$

Другий доданок у правій частині рівняння (7) дозволяє поєднати його з рівнянням (8), звідки випливає, що форма камери змішування ідеального ежектора, в якому здійснюється ізобарний процес змішування, повинна бути складною з конфузотною входною ділянкою, в загальному випадку коноїдальної форми. Профіль дифузора для підвищення тиску змішаного потоку, що має дозвукову швидкість повинен бути виконаний у вигляді розширює каналу, в загальному випадку коноїдальної форми.

На другому етапі термодинамічного аналізу циклу ПЕХМ зроблений вибір раціональних температурних рівнів джерел і приймачів теплоти та робочих речовин.

Показано, що в ПЕХМ температурні рівні двох джерел теплоти можуть бути обрані довільно, третій – завжди залежить від перших двох. Для ПЕХМ незалежними є температурні рівні високо-температурного джерела і навколишнього середовища. Температурний рівень первинної теплової енергії (сонячної енергії, скидної теплоти і теплоти перегріву стислих парів холодоагенту, що виходять з компресора) знаходиться в інтервалі $t_r = 70 \dots 130$ °С. При охолодженні конденсатора проточною або

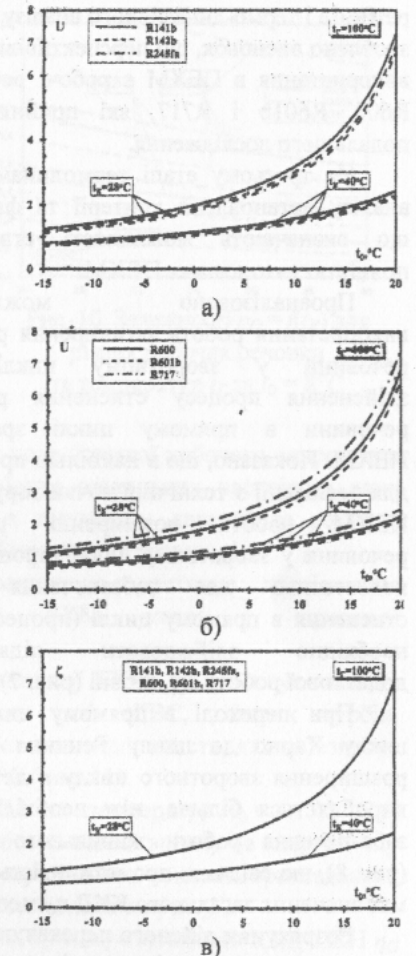


Рис. 6. Залежності $U = f(t_0)$ (а, б) і $\zeta = f(t_0)$ (в) для різних робочих речовин та t_k за $t_r = 100$ °С

зворотному водою температура конденсації t_K може бути прийнята в діапазоні 28...36 °С, а при охолодженні повітрям $t_K = 36...40$ °С.

Визначення раціонального діапазону температур кипіння вироблено за результатами розрахунків коефіцієнта ежекції U і теплового коефіцієнта ζ (рис. 6). Раціональним діапазоном температур кипіння прийнятий $t_0 = -10...20$ °С.

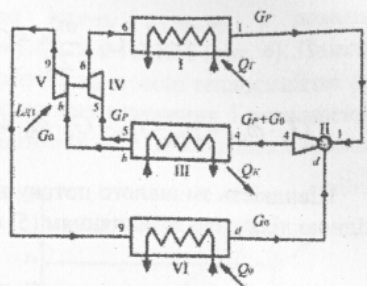
На підставі визначених температурних режимів і термо-динамічного аналізу циклів зроблено висновок, що перспективними для використання в ПЕХМ є робочі речовини R600, R601b і R717, які прийняті для подальшого дослідження.

На третьому етапі термодинамічного аналізу встановлено критерії та фактори, що визначають можливості створення повністю автономних ПЕХМ.

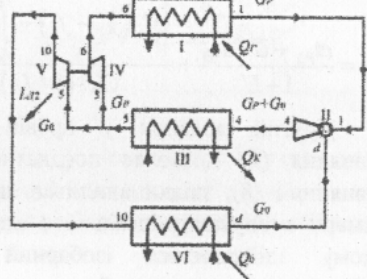
Проаналізовано можливість використання роботи розширення робочої речовини у зворотному циклі для здійснення процесу стиснення робочої речовини в прямому циклі зразкової ПЕХМ. Показано, що в найбільш простому для реалізації з технічної точки зору циклі ПЕХМ роботи розширення робочої речовини у зворотному циклі (процес b-9) недостатньо для забезпечення його стиснення в прямому циклі (процес 5-6) і необхідно здійснювати підведення додаткової роботи $L_{Д1}$ ззовні (рис. 7).

При переході в прямому циклі від циклу Карно до циклу Ренкіна роботи розширення зворотного циклу в детандері виробляється більше, ніж необхідно для забезпечення роботи живильного насоса (рис. 8), що свідчить про можливість створення ПЕХМ з реальним пристроєм, що має значення загального ККД η_0 менше 1 (рис. 9).

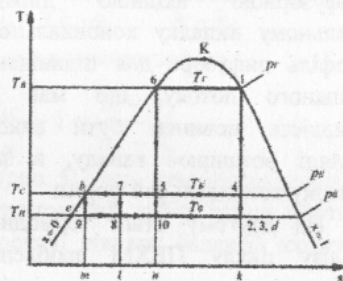
Розрахунки дійсного перекачуючого пристрою показали, що при існуючому ступеня незворотності процесів у ньому, роботоспроможність ПЕХМ може бути реалізована тільки в малому діапазоні характерних для неї робочих режимів при низьких значеннях t_T з малими η_0 або високих значеннях t_T з великими η_0 (рис. 10).



а)



б)



в)

Рис. 7. Принципові схеми (а, б) і оборотні цикли ПЕХМ (в):
I – генератор; II – ежектор;
III – конденсатор; IV – компресор;
V – детандер; VI – випарник

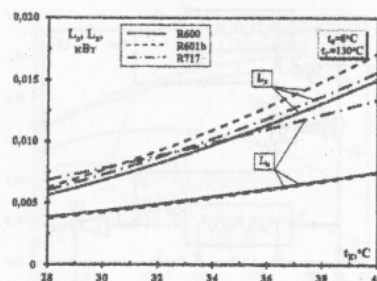
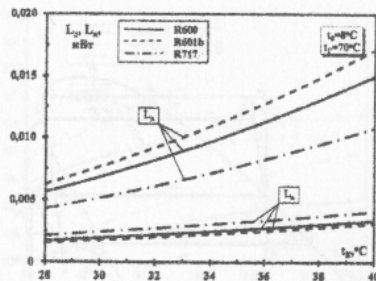


Рис. 8. Залежності $L_{Д}, L_{H} = f(t_K)$ для різних робочих речовин та температур генерації за $t_0 = 8$ °С

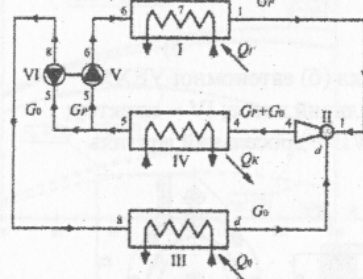


Рис. 9. Принципова схема ПЕХМ:
I – генератор; II – ежектор; III – випарник;
IV – конденсатор; V – живильний насос;
VI – детандер

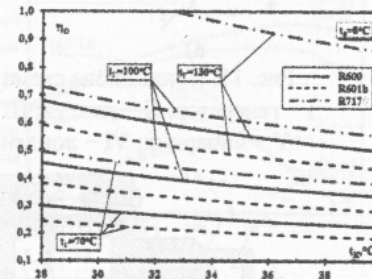


Рис. 10. Залежності $\eta_0 = f(t_K)$ для різних робочих речовин та температур t_T за $t_0 = 8$ °С

Зроблено висновок, що для забезпечення подачі рідкої робочої речовини в генератор ПЕХМ необхідно розглядати варіанти живильних насосів, в яких використовується робота, що одержується в тепловому двигуні за рахунок використання частини робочої пари, яка вироблюється в генераторі.

У третьому розділі проведено розрахунково-теоретичне дослідження автономних утилізаційних і сонячних ЕХМ малої і середньої холодопродуктивності (0,5...20 кВт).

Розглянуто схемно-циклове рішення автономної ЕХМ, що утилізує теплоту енергетичних установок (теплоту вихлопних газів ДВС, газових турбін, автономних електрогенераторів і т.д.) і промислових підприємств, яка забезпечує отримання температури t_T в діапазоні 70...130 °С (рис. 11).

Проведені розрахунки показників УЕХМ за температур $t_0 = 4...12$ °С і $t_K = 28...40$ °С. При цьому особливу увагу приділено оцінці впливу на енергетичну ефективність УЕХМ ступеня досконалості розробленого тепловикористального живильного насоса (ТЖН), креслення якого представлено на рис. 12.

Тепловий коефіцієнт автономної УЕХМ, що враховує загальний ККД ТЖН η_0 визначається за виразом:

$$\zeta = U \cdot \frac{q_0}{q_T} \cdot \left(1 - \frac{v_3}{v_1 \cdot \eta_0} \right) \quad (9)$$

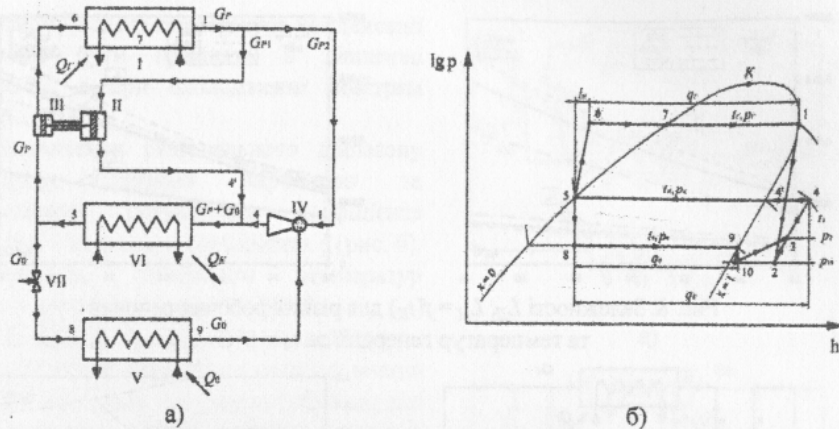


Рис. 11. Принципова схема (а) і цикл (б) автономної УЕХМ:
 I – генератор; II – двигун; III – живильний насос; IV – ежектор;
 V – випарник; VI – конденсатор; VII – дросельний вентиль

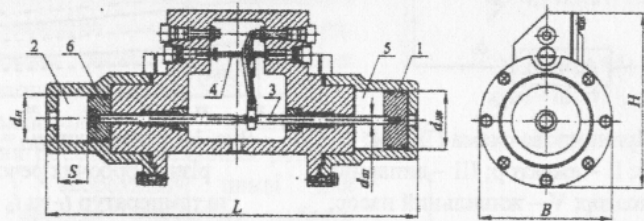


Рис. 12. Креслення тепловикористального живильного насоса:
 1 – поршневий двигун, 2 – поршневий насос, 3 – шток,
 4 – золотниково-важельний механізм, 5, 6 – поршні

Аналіз отриманих результатів показав, що використання ТЖН найбільш доцільно при загальному ККД пристрою η_0 більше 0,4 і низьких температурах конденсації t_K . При низьких значеннях ККД перекачуючого пристрої ($\eta_0 = 0,2...0,4$) роботоспроможність УЕХМ зберігається, проте для цього потрібна наявність великої кількості скидної теплоти (до 50% від потрібної теплового навантаження для роботи ежектора). На рис. 13 як приклад наведено розрахункові залежності теплового коефіцієнта традиційної та автономної УЕХМ – $\zeta' = f(t_K)$ і $\zeta = f(t_T)$, які отримані для різних холодильних агентів і температур конденсації t_K за $t_0 = 8^\circ\text{C}$.

На підставі отриманих даних зроблено висновок, що розроблений ТПН в першу чергу повинен відповідати вимогам простоти конструкції, технологічності виробництва та надійності роботи при можливо невисокому значенні загального ККД η_0 рівним 0,5...0,4.

Для підвищення енергетичної ефективності автономної УЕХМ, що працює на R600 і R601b, розглянуто схемно-циклове рішення установки з подвійною регенерацією теплоти в циклі.

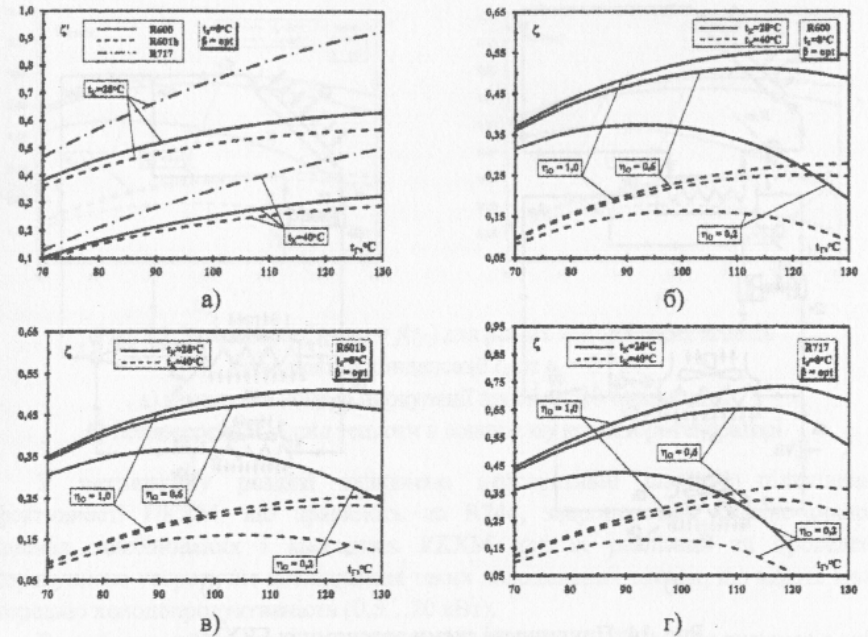


Рис. 13. Залежності $\zeta' = f(t_K)$ (а) і $\zeta = f(t_T)$ (б, в, г) для різних робочих речовин та температур конденсації t_K за $t_0 = 8^\circ\text{C}$

Розрахунки показали, що застосування подвійної регенерації теплоти в циклі призводить до теоретичного підвищення енергетичної ефективності автономних УЕХМ для R600 на 20...40%, R601b – на 25...60%.

Розвитком розглянутої схеми автономної УЕХМ є схемно-циклові рішення автономних ГЕХМ, в яких сонячна енергія перетворюється в теплоту генерації за допомогою сонячних колекторів, що забезпечують розрахункову температуру t_T в діапазоні 70...130 $^\circ\text{C}$ (рис. 15).

Відмінність запропонованих схем автономних ГЕХМ полягає в способі підведення теплоти генерації в циклі: за допомогою проміжного теплоносія – гарячої води, нагрітої в сонячному колекторі, що циркулює по замкнутому контуру «сонячний колектор – генератор» (рис. 14, а), та також безпосередньо в сонячний колектор при циркуляції робочої речовини по каналах геліоприймача (рис. 14, б). Внаслідок цього методика розрахунку характеристик ежекторної складової запропонованих ГЕХМ аналогічна УЕХМ.

Енергетична ефективність автономних ГЕХМ визначається добутком теплового коефіцієнта ζ_{AGEM} і ККД сонячного колектора $\eta_{СК}$:

$$\eta_{AGEM} = \zeta_{AGEM} \cdot \eta_{СК} \quad (10)$$

Величина ζ_{AGEM} визначається за виразом (9), $\eta_{СК}$ – за формулою:

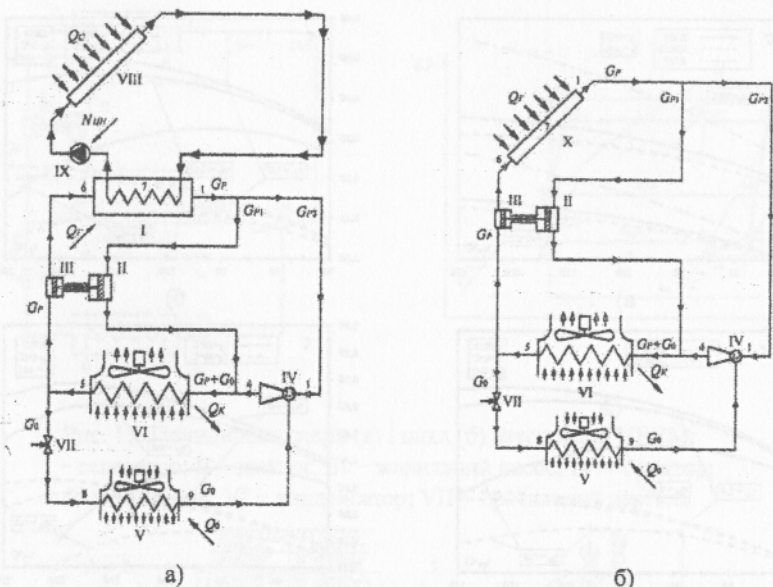


Рис. 14. Принципові схеми автономних ГЕХМ:

- а) із замкнутим контуром циркуляції проміжного теплоносія;
 - б) з безпосереднім підведенням теплоти в сонячному колекторі-генераторі
- I – генератор; II – двигун; III – живильний насос; IV – ежектор; V – випарник;
 VI – конденсатор; VII – дросельний вентиль; VIII – сонячний колектор;
 IX – циркуляційний насос; X – сонячний колектор-генератор

$$\eta_{СК} = \eta_{ОПТ} - \frac{k_{ПР} \cdot (t_{П} - t_{СР})}{I}, \quad (11)$$

де $t_{П}$ – середня температура поверхні геліоприймача, що залежить від способу підведення теплоти генерації, °С.

Проведені розрахунки показників автономних ГЕХМ із замкнутим контуром циркуляції теплоносія та безпосереднім кипінням в сонячному колекторі-генераторі за температур $t_0 = 4...12$ °С, $t_K = 28...40$ °С і $t_{СР} = 25$ °С та величиною $I = 700$ Вт/м². Як сонячний колектор прийнятий плоский геліоколектор з одношаровим склінням і селективним покриттям поверхні, що поглинає промені, для якого $\eta_{ОПТ} = 0,8$, а $k_{ПР} = 3,5$ Вт/(м²·°С).

Визначено, що залежність $\eta_{АГЭХМ} = f(t_T)$ має максимум, який зміщується в область високих температур t_T в міру зростання температури t_K і в область низьких температур t_T в міру зниження величини η_0 (рис. 15). При цьому енергетична ефективність системи при безпосередньому підводі теплоти в сонячному колекторі-генераторі, вище на 5...13% для R600, 13...26% для R601b і 3...5% для R717 в порівнянні з використанням проміжного теплоносія.

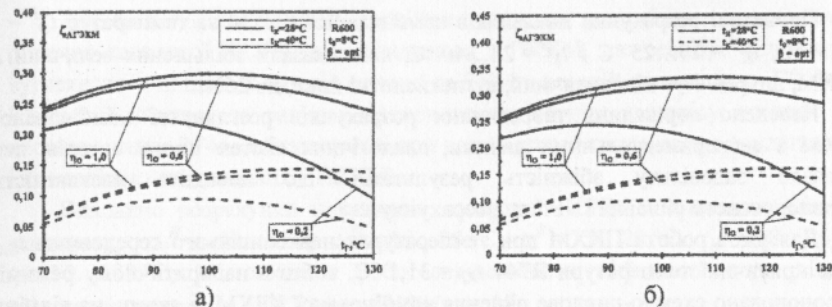


Рис. 15. Залежності $\zeta_{АГЭХМ} = f(t_T)$ для різних холодильних агентів і температур конденсації t_K за $t_0 = 8$ °С:
 а) замкнутий контур циркуляції проміжного теплоносія;
 б) безпосередній підвід теплоти в сонячному колекторі-генераторі

У четвертому розділі визначено перспективні способи підвищення ефективності ПКХМ, що працюють на R744, запропоновані схемно-циклові рішення комбінованих і каскадних КЕХМ для їх реалізації та проведено розрахунково-теоретичне дослідження таких холодильних систем, що мають малу і середню холодопродуктивність (0,5...20 кВт).

Розроблено схемно-циклове рішення комбінованої КЕХМ, що включає в себе одноступеневу ПКХМ, що реалізує підкритичний вуглекислотний цикл, в нижній ступені та ЕХМ у верхній ступені, що використовує для роботи теплоту перегріву стислих парів високого тиску R744 (рис. 16). Отриманий в ЕХМ холод використовується для переохолодження рідкої робочої речовини після конденсатора.

Запропоновано метод визначення параметрів комбінованої КЕХМ, за яких для заданих розрахункових умов, забезпечується найбільш ефективна утилізація теплоти перегрітих парів ПКХМ і тим самим досягається найбільше значення холодильного коефіцієнта ϵ .

Для виконання енергетичного балансу генератора-охолоджувача і генератора-пароохолоджувача повинна виконуватися умова:

$$h_3 - h_4 = \zeta \cdot (h_2 - h_m), \quad (12)$$

Показано, що збільшення різниці температур $(t_3 - t_4)$, а, отже, і різниці ентальпій $(h_3 - h_4)$ призводить до зростання величини ϵ . Крім того, при $t_T \rightarrow t_2$ значення h_m і ζ ростуть, а величина $(h_2 - h_m)$ зменшується, що призводить до зменшення різниці $(h_3 - h_4)$. У межі, при $t_T = t_2$, величина $(h_3 - h_4) = 0$. З іншого боку, при $t_T \rightarrow t_K$, значення h_m і ζ зменшуються, а різниця $(h_2 - h_m)$ зростає. При деякому $t_T > t_K$ величина $\zeta = 0$ і різниця ентальпій $(h_3 - h_4) = 0$.

Зроблено висновок, покладений в основу методу розрахунку, про те, що існує таке оптимальне значення t_T , коли виконується умова $(h_3 - h_4) = \max$. Цій умові, у свою чергу, відповідають максимальна холодопродуктивність ЕХМ і мінімальне значення температури переохолодженої рідини t_4 , які можуть бути досягнуті при заданих розрахункових параметрах.

Проведені розрахунки показників комбінованої КЕХМ за температур $t_0^H = -40...0$ °С, $t_K^H = 20...25$ °С і $t_K^B = 28...40$ °С, які показали збільшення величини ϵ ПКХМ, що реалізує підкритичний, вуглекислотний цикл, до 26%.

Наведено порівняння теоретичних розрахунків розглянутої комбінованої КЕХМ з експериментальними даними, аналогічних систем інших авторів, яке показало задовільну збіжність результатів, що доводить адекватність запропонованого рішення і методу розрахунку.

Для умов роботи ПКХМ при температурах навколишнього середовища t_{OC} вище критичної температури R744 $t_{KP} = 31,1$ °С, тобто в надкритичному режимі, запропоновано схемно-циклове рішення комбінованої КЕХМ, в якому, на відміну від розглянутого вище, відвід теплоти в навколишнє середовище відбувається в пароохолоджувачі за змінною температурою.

Метод розрахунку такої холодильної системи аналогічний методу розрахунку описаному вище. Відмінність полягає в необхідності додаткового визначення оптимального тиску охолодження p_{OX}^{OPT} в нижній ступені, якому відповідає максимальне значення ϵ_{MAX} циклу ПКХМ, і як наслідок найбільш ефективний режим роботи ПКХМ і КЕХМ в цілому.

Проведені розрахунки показників комбінованої КЕХМ за температур $t_0^H = 4...12$ °С, $t_{OX} = 35...40$ °С і $t_K^B = 35...40$ °С, які показали збільшення величини ϵ ПКХМ, що реалізує надкритичний вуглекислотний цикл, до 50%.

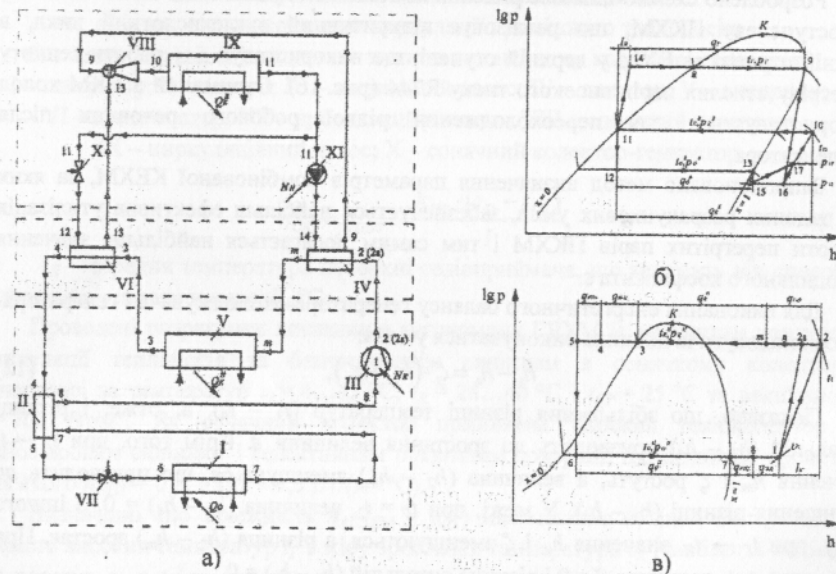


Рис. 16. Принципова схема комбінованої КЕХМ (а) та цикли ЕХМ (б) і ПКХМ (в):

I – випарник; II – рекуперативний теплообмінник; III – компресор; IV – генератор-пароохолоджувач; V – конденсатор; VI – випарник-переохолоджувач; VII, X – регулюючі вентилі, VIII – ежектор; IX – конденсатор; XI – живильний насос

Для застосування в тригенераційних системах розроблено схемно-циклове рішення каскадної КЕХМ, що складається з ПКХМ, що реалізує підкритичний вуглекислотний цикл, в нижній ступені та ЕХМ у верхній ступені (рис. 17). Робота ЕХМ здійснюється за рахунок використання теплоти перегріву стислих парів високого тиску R744, забезпечуючи при цьому низькі температури конденсації t_K^H і як наслідок – підвищення – ПКХМ.

Виконано розрахунки показників каскадної КЕХМ в широкому діапазоні температур: $t_0^H = -40...0$ °С, $t_K^H = 20...25$ °С, $t_0^B = 15...20$ °С, $t_K^B = 28...40$ °С і $t_{r-} = 70...130$ °С, які показали роботоспроможність цієї системи та відносно збільшення величини ϵ ПКХМ до 190% (рис. 18).

На основі запропонованої каскадної КЕХМ розроблені нові схемно-циклові рішення каскадних КЕХМ, в яких передбачено використання основної частини теплоти перегріву стиснутих в компресорі парів R744 для попереднього підігріву робочої речовини, що подається в генератор ЕХМ.

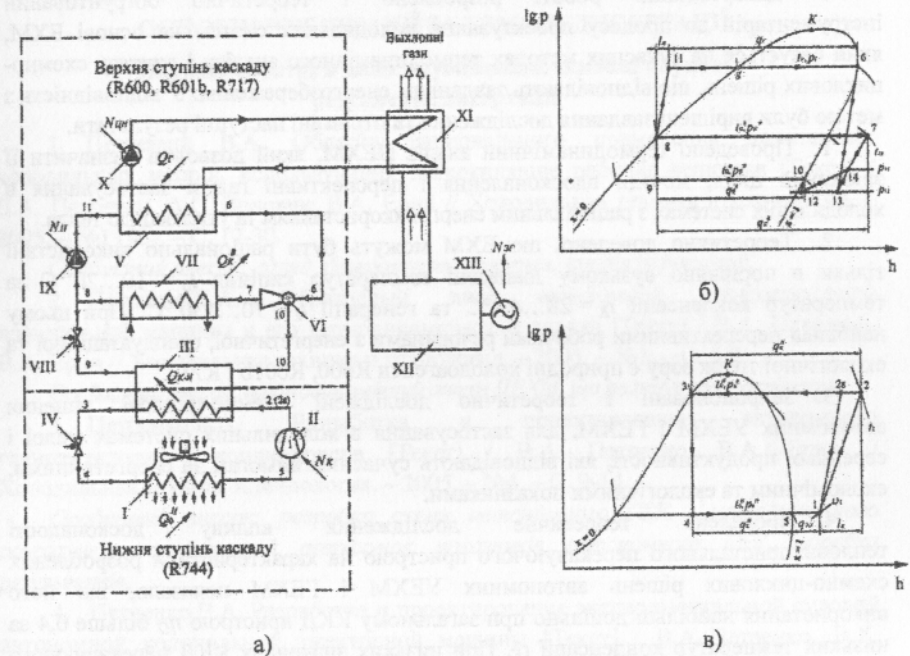


Рис. 17. Принципова схема тригенераційної установки (а) та цикли ЕХМ (б) і ПКХМ (в):

I – випарник; II – компресор; III – конденсатор-випарник; IV, VIII – дросельний вентиль; V – генератор; VI – ежектор; VII – конденсатор; IX – живильний насос; X – циркуляційний насос; XI – котел-утилізатор; XII – ДВС; XIII – електрогенератор

Таке рішення дозволяє значно підвищити ефективність ежекторного циклу і знизити навантаження на випарник ЕХМ. При цьому на таку ж величину також знижується теплове навантаження на конденсатор-випарник каскадної холодильної машини. Це забезпечує істотне зниження масогабаритних характеристик ЕХМ і всієї каскадної системи в цілому.

Розрахунки показують, що для зазначених робочих режимів, зниження теплових навантажень знаходиться у діапазоні 5...100%.

РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено і теоретично обґрунтований інструментарій до процесу проектування холодильних систем на основі ЕХМ, який базується на сучасних методах термодинамічного аналізу і синтезу схемно-циклових рішень, що відповідають завданням енергозбереження. У відповідність з метою були вирішені завдання дослідження та отримані наступні результати.

1. Проведено термодинамічний аналіз ПЕХМ, який дозволив визначити її зразковий цикл, методи вдосконалення і перспективні галузі застосування в холодильних системах з раціональним енерговикористанням та утилізацією тепла.

2. Теоретично доведено, що ЕХМ можуть бути раціонально використані тільки в порівняно вузькому діапазоні температур кипіння $t_0 = -10...20$ °С за температур конденсації $t_K = 28...40$ °С та генерації $t_r = 70...130$ °С. При цьому найбільш перспективними робочими речовинами з енергетичної, експлуатаційної та екологічної точок зору є природні холодоагенти R600, R601b і R717.

3. Запропоновані і теоретично досліджені схемно-циклові рішення автономних УЕХМ і ГЕХМ, для застосування в холодильних системах малої і середньої продуктивності, які відповідають сучасним вимогам за енергетичними, економічними та екологічними показниками.

4. Проведене теоретичне дослідження впливу досконалості тепловикористального перекачуючого пристрою на характеристики розроблених схемно-циклових рішень автономних УЕХМ і ГЕХМ показало, що його використання найбільш доцільно при загальному ККД пристрою η_0 більше 0,4 за низьких температур конденсації t_K . При низьких значеннях ККД перекачуючого пристрою ($\eta_0 = 0,2...0,4$) працездатність УЕХМ і ГЕХМ зберігається, проте для цього потрібна наявність великої кількості скидної теплоти (до 50% від потрібної теплового навантаження для роботи ежектора)

5. Аналіз ГЕХМ з різними системами обігріву генератора дозволив визначити перспективні напрямки застосування таких систем і показав, що енергетична ефективність системи при безпосередньому підводі теплоти в

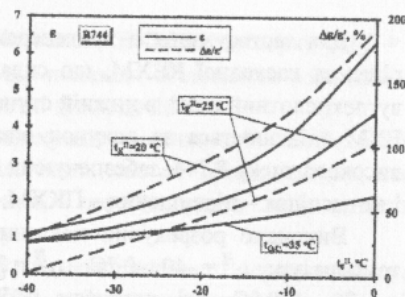


Рис. 18. Залежність $\varepsilon = f(t_0^H)$ для різних температур конденсації t_K та охолодження t_{0K}

сонячному колекторі-генераторі, вище на 5 ... 13% для R600, 13 ... 26% для R601b і 3 ... 5 % для R717 в порівнянні з використанням проміжного теплоносія.

6. Розроблено схемно-циклові вирішення складних комбінованих і каскадних КЕХМ, які засновані на використанні внутрішньої регенерації теплоти для забезпечення роботи ЕХМ і підвищення енергетичної ефективності ПКХМ. Це дало можливість створити складні комбіновані системи з загальним підвищенням енергетичної ефективності ПКХМ на R744 до 60% і тригенераційні системи з використанням каскадної КЕХМ, що забезпечують підвищення ефективності ПКХМ до 50%.

7. Результати дисертаційної роботи є основою для подальшого розвитку наукових досліджень у напрямку створення ЕХМ і відкривають реальні можливості для виробництва в Україні холодильних систем на основі ЕХМ з раціональним енерговикористанням та утилізацією тепла, що відповідають сучасним вимогам з енергетичних, економічних та екологічних показників, і конкурентоспроможних на світовому ринку холодильних машин.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Петренко, В.А. Области рационального применения эжекторных холодильных машин, использующих легкокипящие рабочие вещества [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик, В.А. Ерин // Холодильная техника и технология. – 2005. – №1 (93). – С. 17-30.

Особистий внесок: огляд літературних джерел, аналіз інформації.

2. Петренко В.А. Образцовый цикл автономной парозежекторной холодильной машины и его термодинамический анализ [Текст] / В.А. Петренко, В.А. Ерин // Холодильная техника и технология. – 2005. – №3. – С. 5-9.

Особистий внесок: термодинамічний аналіз ПЕХМ, що реалізує зразковий цикл.

3. Петренко В.А. Разработка и проектирование автономного гелиозежекторного кондиционера [Текст] / В.А. Петренко, В.А. Ерин // Холодильная техника и технология. – 2005. – №4. – С. 9-14.

Особистий внесок: розробка схеми автономного ГЕК і методики його розрахунку, теоретичний розрахунок показників автономного ГЕК, обробка результатів.

4. Петренко В.А. Разработка и проектирование экспериментальной судовой автономной холодильной эжекторной машины [Текст] / В.А. Петренко, В.Х. Кириллов, В.А. Ерин // Вестник Одесского национального морского университета. – 2006. – №. 19 – С. 81-101.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників суднової АЕХМ, проектування експериментальної установки, обробка та оформлення результатів.

5. Петренко В.А. Термодинамический анализ обратимых циклов автономной парозежекторной холодильной машины [Текст] / В.А. Петренко, В.А. Ерин // Холодильная техника и технология. – 2008. – №2. – С. 14-20.

Особистий внесок: термодинамічний аналіз оборотних циклів автономних ПЕХМ, обробка та оформлення результатів.

6. Petrenko V.O. Design-theoretical study of cascade CO₂ sub-critical mechanical compression / butane ejector cooling cycle [Text] / V.O. Petrenko, B.J. Huang, V.O. Ierin // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol.34, Issue 7. – pp. 1649-1656.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників каскадної КЕХМ, обробка та оформлення результатів.

Опубліковані роботи апробаційної характеру

7. Petrenko V.O. Theoretical study and design of solar ejector air conditioner utilizing thermally actuated feed pump machines [Text] / V.O. Petrenko, B.J. Huang, V.O. Ierin // The proceedings of the 4th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning (ACRA 2009). – May 21-22, 2009. – Taipei, Taiwan. – pp. 583-589.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників автономних ГЕХМ, обробка та оформлення результатів.

8. Petrenko V.O. Design-theoretical study of cascade CO₂ sub-critical mechanical-compression/butane ejector cooling cycle [Text] / V.O. Petrenko, B.J. Huang, V.O. Ierin // EURO THERM SEMINAR №85, International seminar on ejector/jet-pump technology and application. – Sept. 7-9, 2009. – Louvain-la-Neuve, Belgium.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників каскадної КЕХМ, обробка та оформлення результатів.

9. Petrenko, V.O. Theoretical study and design of small-scale cascade CO₂ sub-critical mechanical compression/ammonia ejector refrigerating unit [Text] / V.O. Petrenko, B.J. Huang, K.O. Shestopalov, V.O. Ierin, O.S. Volovyk // The proceedings of the 5th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning (ACRA 2010). – June 7-9, 2010. – Tokyo, Japan. – Vol. 5.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників каскадної КЕХМ, обробка та оформлення результатів.

10. Petrenko V.O. Solar and waste heat driven advanced ejector refrigerating machines operating with low boiling refrigerants [Text] / V.O. Petrenko, O.S. Volovyk, V.O. Ierin, K.O. Shestopalov, B.J. Huang // Book of abstracts, 23rd IIR International Congress of Refrigeration. – 21-26 August, 2011. – Prague, Czech Republic. – p. 70.

Особистий внесок: підготовка матеріалів по сонячним і автономним ЕХМ, каскадним КЕХМ.

11. Petrenko V.O. An advanced solar-assisted cascade ejector cooling / CO₂ sub-critical mechanical compression refrigeration system [Text] / V.O. Petrenko, B.J. Huang, K.O. Shestopalov, V.O. Ierin, O.S. Volovyk // The proceedings of the ISES Solar World Congress. – 28 August - 2 September, 2011. – Kassel, Germany.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників сонячної каскадної КЕХМ, обробка та оформлення результатів.

12. Петренко В.А. Каскадные и комбинированные компрессионно-эжекторные холодильные машины, работающие на природных рабочих веществах [Текст] / Петренко В.А., Ерин В.А. // Сборник научных трудов 8-й

Международной научно-технической конференции «Устойчивое развитие и искусственный холод». – Одесса, 2012. – С. 88-93.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників каскадних і комбінованих КЕХМ, обробка та оформлення результатів.

АНОТАЦІЯ

Ерін В.О. Розробка холодильних систем на основі ежекторних машин з раціональним енерговикористанням і утилізацією тепла. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна і компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська національна академія харчових технологій, МОН України, Одеса, 2013.

Дисертація присвячена питанням розробки холодильних систем на основі ежекторних холодильних машин (ЕХМ), що працюють на природних низькокиплячих холодоагентах, з раціональним енерговикористанням і утилізацією тепла.

У роботі отримав подальший розвиток метод термодинамічного аналізу схемно-циклових рішень ЕХМ, що базується на сучасних методах термодинаміки дійсних циклів. Це дозволило здійснити розробку схем холодильних систем на основі ЕХМ, що відповідають сучасним енергетичним, економічним і екологічним вимогам. Розроблені та теоретично досліджені схемно-циклові рішення автономних утилізаційних та сонячних ЕХМ, комбінованих і каскадних компресійно-ежекторних холодильних машин, для застосування в комбінованих і тригенераційних системах.

Ключеві слова: ежектор, ежекторна холодильна машина, енергетична ефективність, каскадні та комбіновані компресійно-ежекторні холодильні машини, енергозбереження, утилізація, сонячна енергія, тригенерація.

АННОТАЦИЯ

Ерин В.А. Разработка холодильных систем на основе эжекторных машин с рациональным энергоиспользованием и утилизацией тепла. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская национальная академия пищевых технологий МОН Украины, Одесса, 2013.

Диссертация посвящена вопросам разработки холодильных систем на основе эжекторных холодильных машин (ЭХМ), работающих на природных низькокипящих хладагентах, с рациональным энергоиспользованием и утилизацией тепла.

В работе получил дальнейшее развитие метод термодинамического анализа схемно-цикловых решений ЭХМ, базирующийся на современных методах термодинамики действительных циклов, что позволило осуществить разработку схем холодильных систем (автономных солнечных и утилизационных, каскадных и комбинированных) на основе ЭХМ, отвечающих современным энергетическим, экономическим и экологическим требованиям.

Проведено теоретическое исследование влияния совершенства теплоиспользующего перекачивающего устройства на характеристики разработанных на основе термодинамического анализа схемно-цикловых решений автономных утилизационных и солнечных ЭХМ, которое доказало возможность реализации таких холодильных систем в широком диапазоне рабочих температур при низком КПД перекачивающего устройства.

Получили дальнейшее развитие методы расчёта характеристик комбинированных и каскадных компрессионно-эжекторных холодильных машин (КЭХМ), состоящих из ПКХМ и ЭХМ, которые позволяют определить параметры парокомпрессионно и эжекторного циклов, при которых для заданных расчетных условий обеспечивается наиболее эффективная утилизация теплоты перегретых паров ПКХМ и тем самым достигается максимальное повышение энергетической эффективности КЭХМ.

Результаты работы представляют практический интерес для производителей холодильного оборудования при проектировании и создании теплоиспользующих ЭХМ, отвечающих современным требованиям по энергетическим, экологическим и экономическим показателям, а также используются в курсе лекций «Современные теплоиспользующие холодильные машины».

Ключевые слова: эжектор, эжекторная холодильная машина, энергетическая эффективность, каскадные и комбинированные компрессионно-эжекторные холодильные машины, энергосбережение, утилизация, солнечная энергия, тригенерация.

ABSTRACT

Ierin V.O. Development of the refrigeration systems based on the ejector machines with rational energy use and heat recovery. – Manuscript.

The thesis for Candidate of science degree by specialty 05.05.14 – “Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems”. – Odessa national academy of food technologies, MES of Ukraine, Odessa, 2013.

The thesis is dedicated to development of refrigeration systems based on ejector refrigeration machine (ERM) operating with natural refrigerants boiling and rational energy use and heat recovery.

The further development of the method of thermodynamic analysis of the ERM solutions based on modern methods of thermodynamics of actual cycles in the thesis is received. It has allowed to develop the refrigeration systems based on ERM satisfy of the modern energy, economic and environmental requirements. The development and theoretical study of the ERM with utilization of waste heat and solar energy as well as combined and cascade compression-ejector refrigeration machines for use in combined and tri-generation systems are carried out.

Keywords: ejector, ejector refrigeration machine, energy efficiency, cascade and combined compression-ejector refrigeration machines, utilization, solar energy, tri-generation.