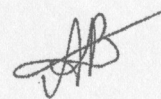


Авторефер
В 68

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ВОЛОВИК ОЛЕКСІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ



УДК 621.574

УДОСКОНАЛЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПОКАЗНИКІВ
ЕЖЕКТОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ, ЩО ПРАЦЮЄ
НА НИЗЬКОКИПЛЯЧИХ РЕЧОВИНАХ

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

xv 957

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Дисертація є рукописом.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Кирилов Володимир Харитонович,
професор кафедри вищої математики
Одеської національної академії харчових
технологій МОН України

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович,
завідувач кафедри кондиціонування
та рефрижерації
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова МОН України,

кандидат технічних наук, доцент
Ванесв Сергій Михайлович,
заступник завідувача кафедри технічної
теплофізики
Сумського державного університету
МОН України

Захист дисертації відбудеться «21» жовтня 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.

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

Зроблено «19» 09 2013р.

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В основних положеннях документа «Енергетична стратегія України на період до 2030 року» передбачено зменшення залежності нашої країни від імпорту енергоресурсів шляхом здійснення активної політики енергозбереження. Енергозбереження має стати одним з основних пріоритетів енергетичної політики України, оскільки зменшення енергоспоживання завдяки застосуванню енергозберігаючих технологій сприяє значному скороченню споживання енергоносіїв.

Частка електричної енергії, яка витрачається на виробництво холоду, стає щороку суттєвішою в енергетичному балансі багатьох країн світу, що негайно потребує широкого застосування тепловикористальних холодильних машин (ТВХМ), зокрема, ежекторних холодильних машин (ЕХМ), які працюють на низькокиплячих речовинах.

Маючи ряд переваг порівняно з іншими ТВХМ, ЕХМ проте мають недостатньо високі енергетичні показники, особливо в нерозрахункових режимах роботи, що стримує їхнє практичне застосування. Поряд з цим не всі способи підвищення їхньої ефективності, а також галузі раціонального використання виявлено та досліджено.

В Україні та інших країнах світу, таких як Австралія, Великобританія, Німеччина, Італія, Ізраїль, Індія, Канада, Китай, Польща, Сінгапур, США, Тайвань, Таїланд, Турція, Швеція, Японія та ін., проводять численні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності ЕХМ, що свідчить про перспективність холодильних машин такого типу. Отже, наразі значний інтерес становить подальше дослідження з метою створення утилізаційних ЕХМ, які відповідають сучасним вимогам за енергетичними, економічними та екологічними показниками та конкурентоспроможних на світовому ринку холодильних машин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Закону України № 74/94-ВР «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р., Закону України № 2509-IV «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» від 05.04.2005 р., Постанови Кабінету Міністрів №2274-11 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року» від 22.02.2001 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є удосконалення характеристик та показників ЕХМ, що працюють на низько киплячих речовинах. Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні **основні завдання:**

1. Провести аналіз сучасних ежекторних холодильних технологій, визначити перспективні напрямки підвищення їхньої ефективності.

ГАЛУЗЕВИЙ
ВІДДІЛ

2. Виконати моделювання роботи ежектора та ЕХМ на різних низькокиплячих речовинах, визначити найбільш перспективні холодоагенти для ЕХМ.

3. Обґрунтувати метод побудування характеристик роботи ежектора на граничних режимах в нерозрахункових умовах експлуатації.

4. Розробити удосконалену конструкцію експериментального ежектора з різними характеристиками проточної частини та автоматизовану ЕХМ, а також методику експериментального дослідження, оброблення і порівняння теоретичних та експериментальних даних.

5. Експериментально дослідити характеристики та показники ЕХМ у широкому діапазоні режимних параметрів і геометричних характеристик ежектора, розвинути фізичні уявлення про гідродинамічні процеси взаємодії потоків у проточній частині ежектора.

6. Розробити рекомендації щодо оптимального проектування та конструювання ежекторів, які працюють на низькокиплячих речовинах.

Об'єктом дослідження є надзвуковий ежектор та ЕХМ, що працюють на низькокиплячих речовинах.

Предметом дослідження є характеристики та показники ежектора та ЕХМ.

Методи дослідження: аналітичне, чисельне моделювання і лабораторне дослідження ежектора та ЕХМ, порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше теоретично доведено та експериментально підтверджено, що для струминних апаратів з незмінними геометричними розмірами проточної частини режим максимальної ефективності має місце не тільки в одному розрахунковому режимі, а й у нерозрахункових режимах – за певної комбінації робочих параметрів, які забезпечують роботу ежектора на граничному режимі;

2. Уперше розроблено метод побудування характеристик ежектора з незмінною геометрією проточної частини під час змінювання параметрів робочого, ежекторного та змішаного потоків, що дає змогу визначити необхідні сполучення параметрів цих потоків, які забезпечують роботу ежектора в нерозрахункових умовах на граничних режимах з максимальним коефіцієнтом ежекції;

3. Дістала подальшого розвитку математична модель надзвукового ежектора з циліндричною та конічно-циліндричною камерами змішування при роботі в розрахункових та нерозрахункових режимах, яка дає змогу визначити оптимальні геометричні розміри проточної частини ежектора, що забезпечують максимальний коефіцієнт ежекції, а також побудувати його характеристики в широкому діапазоні змінних параметрів взаємодіючих потоків;

4. Результати експериментального дослідження ежекторів, що працюють на холодильному агенті R245fa у широкому діапазоні геометричних характеристик ежектора та параметрів робочого, ежекторного та змішаного потоків, дозволили розвинути уявлення про гідродинамічні процеси у проточ-

ній частині ежектора.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечуються коректністю постановок завдань теоретичного й експериментального дослідження, підтвердженням адекватності математичної моделі і добрим узгодженням розрахункових та експериментальних даних, застосуванням сучасних методів експериментального дослідження і високоточного вимірювального обладнання, методів аналітичного та чисельного моделювання відповідно до сучасних українських та світових стандартів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено, створено й досліджено експериментальний зразок автоматизованої ЕХМ з номінальною холодопродуктивністю 10,5 кВт.

2. Запропоновано рекомендації щодо оптимального проектування та конструювання надзвукових ежекторів, які працюють на низькокиплячих речовинах.

3. Уперше запропоновано використання діаграм граничних режимів роботи ежектора для автоматичного регулювання робочих параметрів ЕХМ, що дає змогу суттєво підвищити її ефективність та економічність за умов експлуатації в нерозрахункових режимах.

4. Розроблено схемно-конструктивні рішення та виконано проектування параметричного ряду ЕХМ з холодопродуктивністю 5...100 кВт, що утилізують теплоту різних джерел енергії та призначені для комфортного і технологічного кондиціювання та забезпечення холодом різних технологічних процесів.

5. Визначено найбільш перспективні галузі раціонального застосування ЕХМ, які працюють на низькокиплячих речовинах, що сприяє реалізації Закону України «Про енергозбереження» та Кіотського протоколу про зниження емісії парникових газів.

6. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі на кафедрі «Холодильні машини, установки та системи кондиціювання» ОНАХТ в курсі лекцій «Сучасні тепловикористальні холодильні машини» та в дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні та дослідженні основних методів підвищення ефективності ежектора та ЕХМ, в удосконаленні математичної моделі надзвукового ежектора, моделюванні роботи ежектора та ЕХМ на різних холодоагентах у розрахункових та нерозрахункових режимах, в аналізі та порівнянні результатів теоретичного й експериментального дослідження. Здобувач брав участь у проектуванні експериментального ежектора та ЕХМ, обробленні експериментальних результатів, розробленні технічних проектів ЕХМ загального призначення та виявленні перспективних галузей їхнього застосування. Особистий внесок здобувача підтверджений науковими публікаціями, у яких подано головні ідеї, положення та результати дослідження.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: 2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й та 7-й міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (м. Одеса, Україна, 2002, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 рр.); на 5-й науково-методичній конференції «Людина та оточуюче середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в ВНЗах» (м. Одеса, Україна, 2004 р.), на міжнародній науково-технічній конференції «Промисловий холод та аміак» (м. Одеса, Україна, 2006 р.), на міжнародній конференції «Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA 2009» (м. Тайпей, Тайвань, 2009 р.), на міжнародній конференції «Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA 2010» (м. Токіо, Японія, 2010 р.), на міжнародному семінарі «International seminar ejector/jet-pump technology and application, EUROTHERM SEMINAR Nr. 85» (м. Брюссель, Бельгія, 2009 р.), на міжнародній конференції «International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, EuroSun 2010» (м. Грац, Австрія, 2010 р.), на міжнародних конгресах «23rd IIR International Congress of Refrigeration» (м. Прага, Чехія, 2011 р.) та «ISES Solar World Congress» (м. Кассель, Німеччина, 2011 р.), на 8-й міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток та штучний холод» (м. Одеса, Україна, 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 35 публікаціях, з-поміж яких 13 статей опубліковано у фахових наукових журналах, затверджених положенням МОН України, і 22 тези доповідей та докладів – у збірниках наукових праць міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Зміст роботи викладено на 278 сторінках машинописного тексту, у тому числі 113 рисунків (53 сторінки), 11 таблиць (8 сторінок) та список використаних джерел з 264 найменувань (30 сторінок). Обсяг додатків становить 31 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету і головні завдання дисертаційної роботи, стисло викладено методологічні засади досліджень, визначено наукову новизну, теоретичне та практичне значення здобутих результатів, відображено повноту їхнього викладу в публікаціях та ступінь їхньої апробації на конференціях.

У першому розділі подано огляд теоретичних та експериментальних праць, присвячених удосконаленню ЕХМ, які працюють на воді та низькокиплячих порівняно з водою речовинах. З-поміж численних робіт у галузі використання в ЕХМ низькокиплячих речовин, необхідно особливо відзначити наукові праці таких дослідників, як В.С. Мартиновський, С.З. Жадан, Ю.В. Захаров, Л.М. Андреев, А.Л. Лехмус, В.О. Петренко, Н.О. Щетиніна, I.W. Eames, D.W. Sun, B.J. Huang та ін. Наразі серед найвідоміших сучасних методик розра-

хунку надзвукового ежектора широко застосовують методики Є.Я. Соколова та Н.М. Зінгера, J.H. Keenan та Е.Р. Neumann, J.T. Munday та D.F. Bagster. Аналіз показав, що найбільш перспективною є методика Є.Я. Соколова та Н.М. Зінгера, яка базується на теорії граничних режимів М.Д. Міліонщикова та Г.М. Рябінкова.

Проведений огляд дає змогу зробити висновок про те, що останнім часом спостерігається підвищений інтерес до ЕХМ, які працюють на низькокиплячих речовинах. На підставі аналізу наявної інформації визначено перспективні напрямки підвищення ефективності ЕХМ та сформульовано головні задачі дослідження.

У другому розділі проведено термодинамічний аналіз, що пов'язує робочі параметри циклу та термодинамічні властивості робочої речовини з енергетичними та експлуатаційними показниками ЕХМ, який дав змогу встановити джерела необоротності в ЕХМ та визначити напрямки підвищення її ефективності, основними з яких є: 1) використання перспективної робочої речовини; 2) оптимізація профілю та геометричних параметрів проточної частини ежектора; 3) удосконалення схеми ЕХМ та її робочого циклу.

У розділі описано математичну модель роботи ежектора з циліндричною (ЦКЗ) та конічно-циліндричною (КЦКЗ) камерами змішування у розрахункових та нерозрахункових режимах, схеми проточних частин яких наведено на рис. 1.

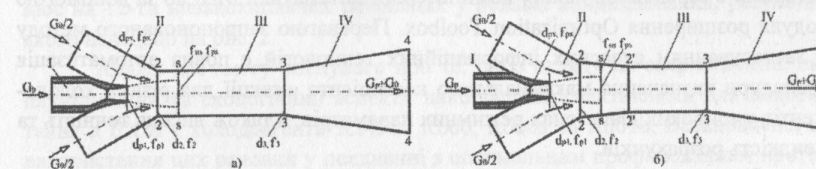


Рис. 1. Схема проточної частини ежектора з ЦКЗ (а) та з КЦКЗ (б).

I – сопло; II – приймальна камера; III – камера змішування; IV – дифузор.

На базі методики Є.Я. Соколова та Н.М. Зінгера запропоновано метод, який дає змогу звести комплексний розрахунок максимального коефіцієнта ежекції U до задачі нелінійного програмування для цільової функції вигляду $U = U(x_1, x_2, p_1, p_2 \dots p_k) \Rightarrow MAX$, якою є вираз для визначення коефіцієнта ежекції:

$$U \cdot \sqrt{\Theta} = \frac{K_1 \cdot \lambda_{p,n} - \lambda_{e3} + K_3}{\lambda_{e3} + K_4 - K_2 \cdot \lambda_{n2}}, \quad (1)$$

де $\lambda_{n2} = x_1$ та $\lambda_{e3} = x_2$ – незалежні змінні;

x_1 – зведена ізоентропна швидкість ежекторного потоку у вхідному перерізі 2-2 камери змішування λ_{n2} ; x_2 – зведена ізоентропна швидкість змішаного потоку у вихідному перерізі 3-3 камери змішування λ_{e3} ; $p_1, p_2 \dots p_k$ – параметри

цільової функції; λ_{pi} – зведена ізоентропна швидкість робочого потоку; Θ – безрозмірна температура; K_1, K_2, K_3, K_4 – коефіцієнти швидкості.

Нелінійні обмеження записуються у вигляді таких рівностей:

$$\left(\mu - \frac{P_c}{P_p} \cdot \frac{q_{c3}}{q_{ps}}\right) \cdot (\lambda_{c3} + K_4 - K_2 \cdot \lambda_{n2}) - \left(\mu - \frac{P_c}{P_n} \cdot q_{c3}\right) \cdot (\lambda_{c3} + K_3 - K_1 \cdot \lambda_{p,n}) = 0, \quad (2)$$

$$\left(\mu - \frac{P_c}{P_p} \cdot \frac{q_{c3}}{q_{ps}}\right) \cdot \left(\beta - \frac{P_c}{P_n} \cdot \frac{q_{c3}}{q_{n2}}\right) - \left(\mu - \frac{P_c}{P_n} \cdot q_{c3}\right) \cdot \left(\beta - \frac{P_c}{P_p} \cdot \frac{q_{c3}}{q_{ps}}\right) = 0, \quad (3)$$

де $\mu = f_3/f_3$; $\beta = f_2/f_3$; p_p, p_{n2}, p_c – тиски робочого, ежектованого та змішаного потоків відповідно, бар; $q_{p,n}, q_{n2}, q_{c3}$ – зведена масова швидкість робочого та ежектованого потоків у перерізі 2-2 та змішаного потоку у перерізі 3-3 відповідно.

Лінійні обмеження записуються так:

$$0 < \lambda_{c3} \leq 1, \quad 0 < \lambda_{n2} \leq 1, \quad 0 < \lambda_{ns} \leq 1, \quad (4)$$

де λ_{ns} – зведена ізоентропна швидкість ежектованого потоку у перерізі s (неявне лінійне обмеження, яке проявляється у нелінійному обмеженні (2)).

Задача нелінійного програмування (1)-(4) розв'язується градієнтними методами в середовищі пакету комп'ютерної математики MatLab за допомогою модуля розширення Optimization Toolbox. Перевагою запропонованого методу із застосуванням сучасних інформаційних технологій є повна автоматизація процедури визначення максимального коефіцієнта ежекції для різних холодоагентів у широких діапазонах режимних параметрів, а також висока точність та швидкість розрахунків.

Запропонований метод у заданих робочих температурах та робочій речовині дає змогу визначити максимальний коефіцієнт ежекції U ежектора як із ЦКЗ, так і з КЦКЗ. При цьому для ЦКЗ $\beta = 1$, а для КЦКЗ визначають оптимальне значення β , якому відповідає максимальне значення U .

Характеристика ежектора, що визначає його роботу в нерозрахунковому режимі, складається з двох гілок – дограничної та надграничної, які збігаються в одній точці.

Рівняння надграничної гілки характеристики ежектора має вигляд:

$$U \cdot \sqrt{\Theta} = \frac{P_n}{P_p} \cdot \left(\mu \cdot \frac{f_3}{f_{px}} - \frac{f_{p1}}{f_{px}} \right) \quad (5)$$

Для побудовання дограничної гілки характеристики ежектора необхідно розв'язати рівняння (6), (7) та (8):

$$\lambda_{n2} \cdot \left(\frac{P_{n2}}{P_x} \right)^k - \frac{f_{px}}{f_{n2}} \cdot \frac{P_p}{P_n} \cdot U \cdot \sqrt{\Theta} = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_{c3} \cdot \left(\frac{P_{c3}}{P_x} \right)^k - \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{P_p}{P_c} \cdot (1 + U \cdot \sqrt{\Theta}) = 0, \quad (7)$$

$$P_{c3} \cdot \frac{P_c}{P_n} - P_{p2} \cdot \frac{f_{p2}}{f_3} \cdot \frac{P_p}{P_n} - P_{n2} \cdot \frac{f_{n2}}{f_3} - \frac{k \cdot P_x}{\varphi_3} \cdot \frac{f_{px}}{f_3} \cdot \frac{P_p}{P_n} \times \\ \times [K_1 \cdot \lambda_{n2} \cdot U \cdot \sqrt{\Theta} - (1 + U \cdot \sqrt{\Theta}) \cdot \lambda_{c3}] = 0 \quad (8)$$

де P_x – критичний відносний тиск; P_{p2}, P_{n2}, P_{c2} – відносний тиск робочого та ежектованого потоків у перерізі 2-2 та змішаного потоку у перерізі 3-3 відповідно.

Перевірка адекватності математичної моделі із застосуванням експериментальних даних, здобутих у попередніх дослідженнях на холодоагентах R141b, R142b та R236fa показала високу вірогідність визначення коефіцієнта ежекції у широкому діапазоні параметрів робочого, ежектованого та змішаного потоків, що підтверджується гарним узгодженням дослідних та розрахункових даних.

Проведено порівняльний аналіз енергетичних показників ЕХМ, що працює на 12-ти низькокиплячих речовинах у режимі кондиціювання, результати якого наведено на рис. 2.

Аналіз дає змогу висувати про те, що з огляду на енергетичний, експлуатаційний та екологічний аспекти найбільш перспективними для використання в ЕХМ є холодоагенти R245fa, R600, R600a та R601b. Встановлено, що використання цих речовин у поєднанні з оптимальним профілюванням проточної частини ежектора та застосуванням у схемі ЕХМ подвійної регенерації теплоти суттєво підвищує її енергетичні показники. За результатами аналізу для подальшого дослідження був обраний холодоагент R245fa.

Результати теоретичних досліджень використано для обґрунтування нового методу побудовання характеристик ежектора з незмінною геометрією проточної частини під час змінювання параметрів робочого, ежектованого та змішаного потоків, графічну інтерпретацію якого подано на рис. 3. За умови відомого діапазону відхилення температури t_0 від розрахункового значення, застосовуючи новий метод, можна визначити такий діапазон зміни t_1 , за якого соплу ежектора з геометричною характеристикою f_{c1}/f_{cx} продовжує працювати в розрахункових умовах (рис. 3а), а також визначити діапазон зміни граничних температур конденсації t_K^{PP} , за яких надзвуківий ежектор з геометричними характеристиками f_{c1}/f_{cx} та f_3/f_{cx} працює на граничних режимах (рис. 3б).

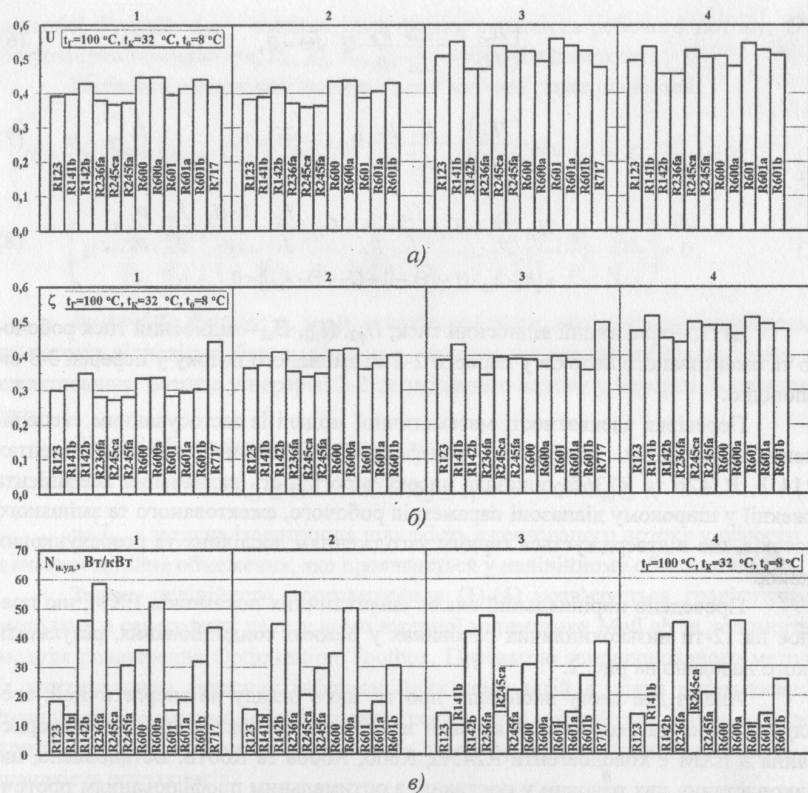


Рис. 2. Порівняння показників U (а), ζ (б) та $N_{н.уд}$ (в) для різних холодоагентів за $t_Г=100\text{ }^\circ\text{C}$, $t_К=32\text{ }^\circ\text{C}$ і $t_0=8\text{ }^\circ\text{C}$:

1 – ЕХМ без регенерації теплоти, ежектор із ЦКЗ; 2 – ЕХМ з регенерацією теплоти, ежектор із ЦКЗ; 3 – ЕХМ без регенерації теплоти, ежектор із КЦКЗ; 4 – ЕХМ з регенерацією теплоти, ежектор із КЦКЗ

Здобуті значення $t_Г$ та $t_К^{PP}$ використовують для визначення граничних коефіцієнтів ежекції (рис. 3в) та для побудовання діаграм граничних режимів $U^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$ (рис. 3г).

Аналогічно для отриманих значень $t_Г$ і $t_К^{PP}$ будують діаграми $\zeta^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$, $Q_0^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$, $Q_Г^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$ та $Q_К^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$, за допомогою яких на стадії проектування ЕХМ визначають діапазони зміни показників ЕХМ та максимальні навантаги на теплообмінні апарати.

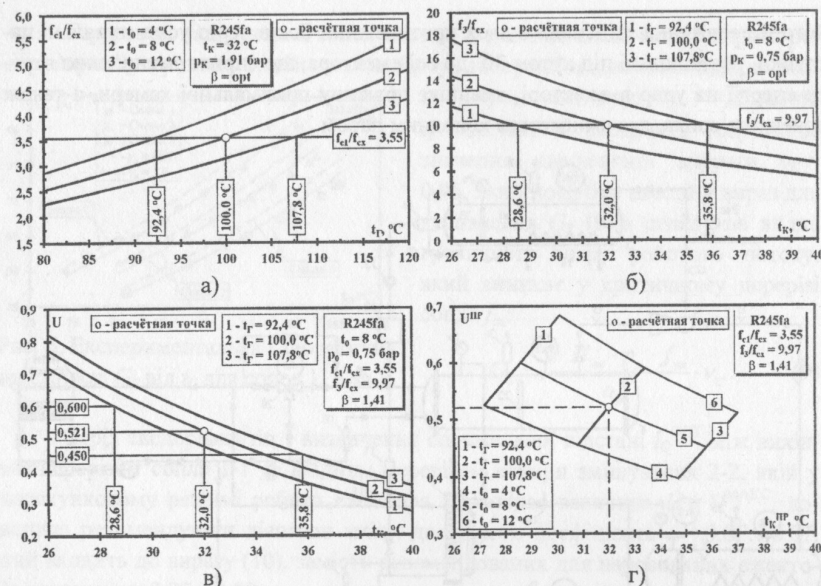


Рис. 3. Залежності $f_{c1}/f_{cx} = f(t_Г)$ (а), $f_3/f_{cx} = f(t_К)$ (б), $U = f(t_Г)$ (в) та діаграма граничних режимів $U^{PP} = f(t_0, t_К^{PP}, t_Г)$ (г).

Узагальнено результати попередніх досліджень та практичних рекомендацій, а також досліджено вплив окремих елементів ежектора на ефективність його роботи, що дало змогу сформулювати рекомендації щодо проектування та конструювання ежекторів, які працюють на низькокиплячих речовинах.

У третьому розділі подано результати експериментального дослідження ежектора та ЕХМ, які працюють на холодоагенті R245fa. Дослідження виконано на експериментальному стенді, який забезпечував проведення випробування у широкому діапазоні режимних параметрів, швидке встановлення, стабільне підтримання та плавне регулювання необхідних теплових режимів, проведення випробувань в розрахункових та нерозрахункових умовах роботи, а також просте та високоточне визначення основних характеристик та показників ежектора та ЕХМ. Принципова схема експериментальної ЕХМ наведена на рис. 4.

Для визначення впливу основних геометричних характеристик проточної частини ежектора на ефективність його роботи було спроектовано та виготовлено експериментальний ежектор зі змінними соплами та камерами змішування, зовнішній вигляд якого унаочнено на рис. 5. Конструкція ежектора передбачала можливість осьового переміщення сопла з метою встановлення його в оптимальному положенні відносно вхідного перерізу камери змішування. Для забезпечення рівномірного розподілу ежекторного пару в приймальній камері

його підводження здійснено з двох протилежних боків через усмоктувальні патрубки, розташовані під кутом 30° до осі ежектора, що сприяє зменшенню втрати енергії на удар в ежекторі, зменшує довжину приймальної камери, а також поверхню сопла, яка омивається холодним паром.

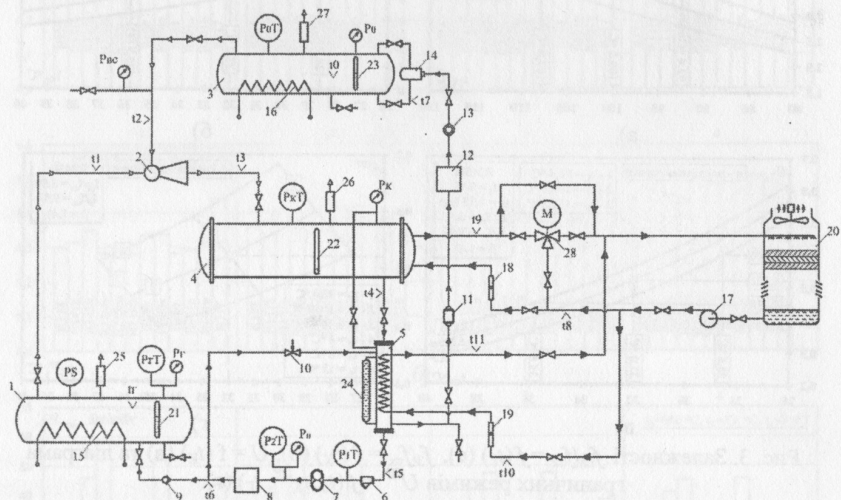


Рис. 4. Принципова схема експериментальної ЕХМ:

- 1 – парогенератор; 2 – ежектор; 3 – випарник; 4 – конденсатор; 5 – ресивер-переохолоджувач; 6 – фільтр механічного очищення; 7 – живильний насос; 8 – витратомір робочої речовини; 9 – зворотний клапан; 10 – байпасний вентиль; 11 – фільтр-осушувач; 12 – витратомір холодоагенту; 13 – оглядове скло; 14 – поплавковий регулюючий вентиль; 15, 16 – електронагрівачі; 17 – циркуляційний водяний насос; 18, 19 – ротаметри; 20 – градирня; 21, 22, 23 – скляні показчики рівня; 24 – електромагнітний показчик рівня; 25, 26, 27 – запобіжні клапани; 28 – триходовий водорегулюючий вентиль.

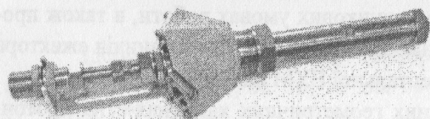


Рис. 5. Зовнішній вигляд експериментального ежектора.

Для експериментального дослідження було виготовлено 3 надзвукових сопла (1, 2 та 3), та 6 камер змішування – 3 циліндричних (А, В та С) і 3 конічно-циліндричних (1, 2 та 3). Зміна основної геометричної характеристики експериментального ежектора f_3/f_{cx} здійснювалася двома способами: зміною розміру критичного перерізу сопла при тій самій камері змішування, або зміною діаметра камери змішування за незмінно діаметра критичного перерізу сопла.

Для експериментального дослідження було виготовлено 3 надзвукових сопла (1, 2 та 3), та 6 камер змішування – 3 циліндричних (А, В та С) і 3 конічно-циліндричних (1, 2 та 3). Зміна основної геометричної характеристики експериментального ежектора f_3/f_{cx} здійснювалася двома способами: зміною розміру критичного перерізу сопла при тій самій камері змішування, або зміною діаметра камери змішування за незмінно діаметра критичного перерізу сопла.

Тарування надзвукових сопел ежектора з метою визначення витрати робочої пари G_p через них за різних температур генерації t_{Γ} (див. рис. 6) дало змогу у розглянутому діапазоні

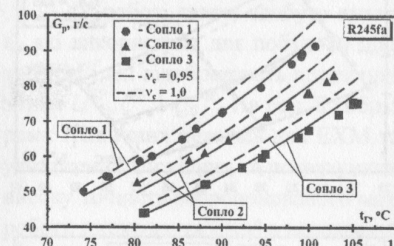


Рис. 6. Експериментальна і теоретична залежності G_p від t_{Γ} для сопел 1, 2 та 3.

у розглянутому діапазоні $t_{\Gamma} = 75 \dots 105 \text{ } ^\circ\text{C}$ визначити усереднене значення коефіцієнта витрати $v_c = 0,95$, який потрібно ввести у вираз для визначення G_p (9) з огляду на вплив граничного шару робочого потоку, який виникає у критичному перерізі сопла f_{cx} :

$$G_p = \frac{k \cdot \Pi_{px} \cdot p_p \cdot f_{px}}{a_{px}} \cdot v_c \quad (9)$$

Серія експериментів з визначення оптимальної відстані l_c^{OPT} між вихідним перерізом сопла 1-1 та входним перерізом камери змішування 2-2, якій у розрахунковому режимі роботи ежектора відповідає величина $U = U^{МАКС}$, дозволила рекомендувати діапазон зміни дослідного коефіцієнта $a = 0,06 \dots 0,07$, який входить до виразу (10), замість рекомендованих для пароводяних ежекторів значень $a = 0,07 \dots 0,09$:

$$l_c^{OPT} = (\sqrt{0,083 + 0,76 \cdot U} - 0,29) \cdot d_i / (2 \cdot a) \quad (10)$$

Решту досліджень з визначення ефективності ежектора та ЕХМ у розрахункових та нерозрахункових режимах проведено при відповідних значеннях l_c^{OPT} , поданих у таблиці 1, у якій цифрами та буквами позначено комбінації «сопло-камера змішування», наприклад 1-А – сопло 1, камера змішування А.

Таблиця 1
Експериментальні значення f_3/f_{cx} та l_c^{OPT} для досліджуваних ежекторів.

Ежектор	1-А	1-В	1-С	2-А	2-В	2-С	3-А	3-В	3-С
f_3/f_{cx}	7,25	8,32	9,63	8,33	9,55	11,06	9,70	11,14	12,89
l_c^{OPT} , мм	16,4	19,3	22,8	16,2	20,6	24,2	20,5	22,9	26,3

Експериментальне дослідження впливу температур t_{Γ} , t_K і t_0 на ефективність роботи 9 ежекторів із ЦКЗ, що відображено у Таблиці 1, а також на ефективність ЕХМ загалом, дали змогу дістати експериментальні значення U , ζ та Q_0 у широких границях робочих температур, діапазон зміни яких дорівнював $t_0 = 4 \dots 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_K = 23 \dots 44 \text{ } ^\circ\text{C}$ і $t_{\Gamma} = 82 \dots 105 \text{ } ^\circ\text{C}$. На рис. 7 в якості прикладу наведені експериментальні характеристики $U = f(t_K)$, $\zeta = f(t_K)$ і $Q_0 = f(t_K)$ ежектора 2-В, здобуті за незмінної $t_0 = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$ та значеннях $t_{\Gamma} = 88, 95$ і $102 \text{ } ^\circ\text{C}$. З даних рис. 7 випливає, що коли значення $t_K < t_K^{IP}$, величина U не змінюється, а показники ζ та Q_0 несуттєво зростають.

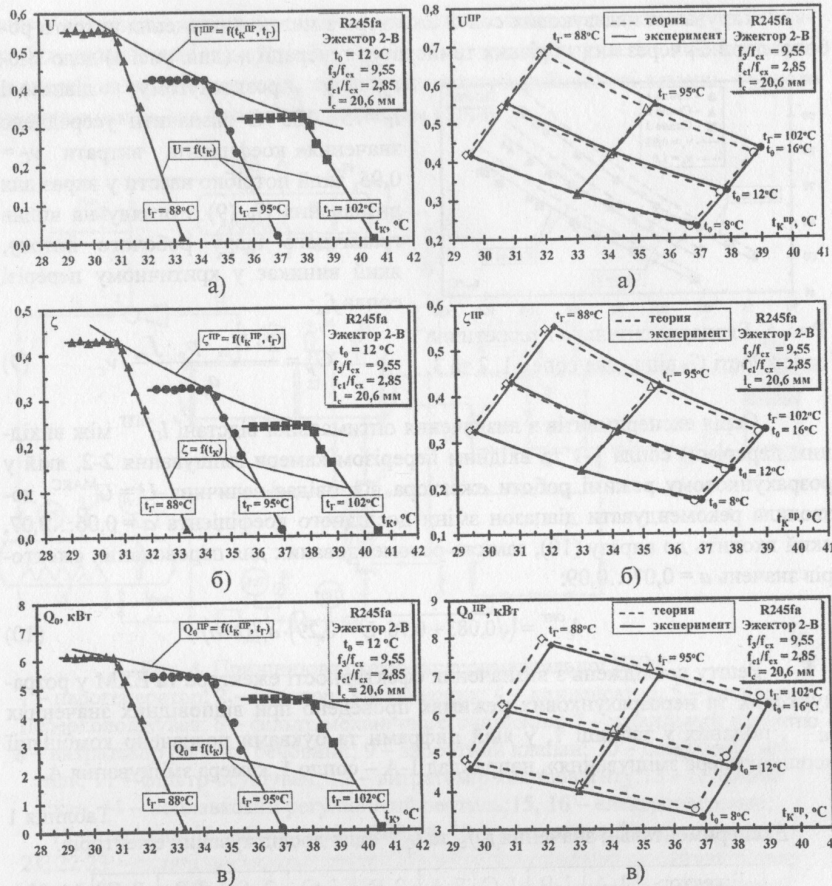


Рис. 7. Експериментальні характеристики $U = f(t_k)$ (а), $\zeta = f(t_k)$ (б) та $Q_0 = f(t_k)$ (в) для ежектора 2-В за $t_r = 88, 95$ і 102°C та $t_0 = 12^\circ\text{C}$

Рис. 8. Експериментальні діаграми граничних режимів і теоретичні залежності $U^{\text{ПП}} = f(t_r, t_k^{\text{ПП}}, t_0)$ (а), $\zeta^{\text{ПП}} = f(t_r, t_k^{\text{ПП}}, t_0)$ (б) та $Q_0^{\text{ПП}} = f(t_r, t_k^{\text{ПП}}, t_0)$ (в) для ежектора 2-В

Робота ежектора за $t_k > t_k^{\text{ПП}}$ призводить до різкого зниження величин U , ζ і Q_0 , та за $t_k = t_k^{\text{ПП}} + (2,5...2,7)^\circ\text{C}$ вони дорівнюють нулю, а ЕХМ припиняє виробництво холоду.

Аналіз даних рис. 7 показав, що залежності граничних значень $U^{\text{ПП}} = f(t_k^{\text{ПП}}, t_r)$, $\zeta^{\text{ПП}} = f(t_k^{\text{ПП}}, t_r)$ та $Q_0^{\text{ПП}} = f(t_k^{\text{ПП}}, t_r)$ мають практично лінійний характер. При цьому найбільший нахил спостерігаємо на лінії $U^{\text{ПП}} = f(t_k^{\text{ПП}}, t_r)$, а найменший – $Q_0^{\text{ПП}} = f(t_k^{\text{ПП}}, t_r)$, яка несуттєво відхиляється від горизонтальної

прямої $Q_0 = 5,7$ кВт, що відповідає номінальній холодопродуктивності ЕХМ під час її роботи з ежектором 2-В за $t_r = 95^\circ\text{C}$ і $t_0 = 12^\circ\text{C}$.

У роботі також здобуто аналогічні характеристики за нерозрахованих t_0 , які використано для побудови діаграм граничних режимів роботи ежектора та ЕХМ і які відображають вплив одночасного змінювання t_r , $t_k^{\text{ПП}}$ та t_0 на показники $U^{\text{ПП}}$, $\zeta^{\text{ПП}}$ і $Q_0^{\text{ПП}}$. На рис. 8 зображені експериментальні та теоретичні діаграми граничних режимів для ЕХМ та ежектора 2-В. На рис. 8 фіксуємо добре узгодження дослідних та розрахункових даних, що, своєю чергою, підтверджує високу точність запропонованого методу побудови діаграм граничних режимів роботи ежектора та ЕХМ в нерозрахованих умовах.

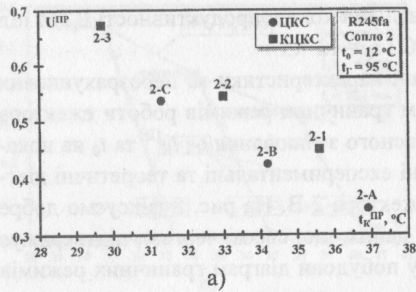
Закономірності, згадані вище, спостерігаємо також і для решти експериментально досліджених ежекторів, наведених у Таблиці 1.

У роботі проаналізовано можливість підвищення ефективності ЕХМ шляхом удосконалення профілю проточної частини ежектора, для чого проведено дослідження 9 ежекторів із КЦКЗ з тими самими положеннями сопла, з якими вивчено ежектори з ЦКЗ. При цьому в діапазонах зміни робочих температур ЕХМ $t_0 = 4...20^\circ\text{C}$, $t_k = 21,8...43,3^\circ\text{C}$ і $t_r = 82...105^\circ\text{C}$ для розглянутих ежекторів із КЦКЗ, як і під час досліджень ЕХМ та ежекторів із ЦКЗ, визначено експериментальні показники U , ζ та Q_0 .

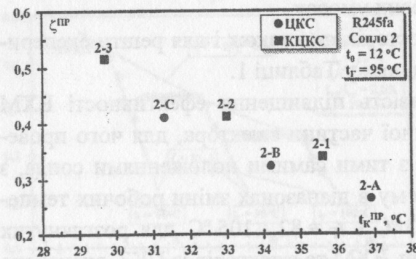
Аналіз експериментальних даних показав, що характер залежностей $U = f(t_k)$, $\zeta = f(t_k)$ та $Q_0 = f(t_k)$ за незмінної t_0 для ежекторів із КЦКЗ не відрізняється від аналогічних залежностей для ежекторів із ЦКЗ, що проілюстровано на рис. 7, причому для ЕХМ та ежекторів із КЦКЗ фіксуємо вищі значення $U^{\text{ПП}}$, $\zeta^{\text{ПП}}$ і $Q_0^{\text{ПП}}$ за нижчих значеннях $t_k^{\text{ПП}}$ порівняно з ЕХМ та ежекторами із ЦКЗ. На рис. 9 зіставлено експериментальні дані, здобуті для ежекторів 2-А, 2-В, 2-С – із ЦКЗ та ежекторів 2-1, 2-2, 2-3 – із КЦКЗ у номінальних режимах за температур $t_0 = 12^\circ\text{C}$ і $t_r = 95^\circ\text{C}$. На ґрунті проаналізованих даних з'ясовуємо (див. рис. 9), що застосування в ежекторі КЦКЗ дає змогу підвищити значення величин $U^{\text{ПП}}$, $\zeta^{\text{ПП}}$ та $Q_0^{\text{ПП}}$ в середньому на 19...26 % порівняно із застосуванням в ежекторі ЦКЗ за цих самих робочих умов.

На рис. 10 наведено експериментальні та розрахункові діаграми граничних режимів роботи ежектора 2-2. Дані рис. 10 підтверджують, що характер цих діаграм для ежектора з КЦКЗ не відрізняється від аналогічних діаграм для ежектора з ЦКЗ і теоретичні залежності, здобуті для ежектора 2-2, який працює на другому граничному режимі, достатньо добре узгоджуються з експериментальними даними.

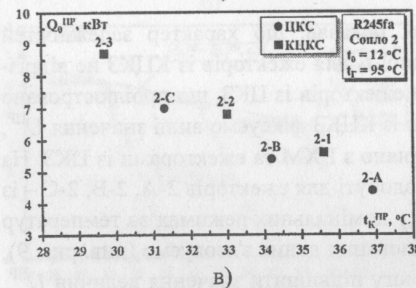
Аналіз похибок показників ефективності ЕХМ під час її роботи у розрахункових режимах дав змогу встановити, що з довірчою імовірністю $\alpha = 0,95$ відносні похибки ΔU , ΔQ_0 , та $\Delta \zeta$ не перевищували 4,0, 3,0 і 6,0 %, відповідно.



а)



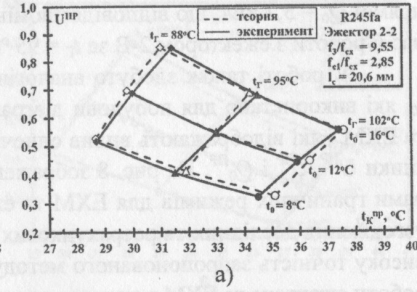
б)



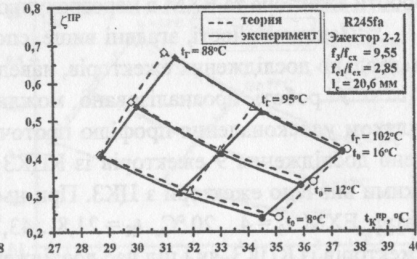
в)

Рис. 9. Порівняння експериментальних показників U^{PP} (а), ζ^{PP} (б) та Q_0^{PP} (в) для ежекторів із соплотом 2 за $t_0 = 12^\circ\text{C}$ та $t_g = 95^\circ\text{C}$

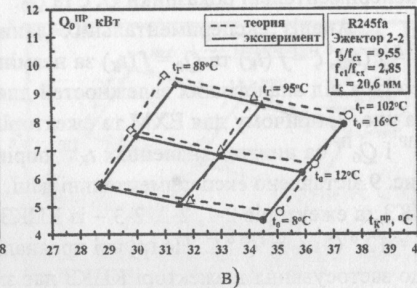
Вивчення фізичної картини процесів, що відбувалися в досліджуваних ежекторах, показало, що у разі зміни t_g площа камери змішування для ежектора з ЦКЗ в перерізі s-s залишається незмінною, тобто $f_s = f_3$, у той час як для ежектора з КЦКЗ вона змінюється у діапазоні $f_3 \leq f_s \leq f_2$ або $f_3 \leq \mu' f_3 \leq \beta f_3$ (див. рис. 1). При цьому величина μ , яка визначає площу перерізу s-s та його положення у конічній частині камери змішування, змінюється в межах $1 \leq \mu \leq \beta$.



а)



б)



в)

Рис. 10. Експериментальні та теоретичні діаграми граничних режимів $U^{PP} = f(t_g, t_k^{PP}, t_0)$ (а), $\zeta^{PP} = f(t_g, t_k^{PP}, t_0)$ (б) та $Q_0^{PP} = f(t_g, t_k^{PP}, t_0)$ (в) для ежектора 2-2

Сьогодні немає рекомендацій щодо визначення величини μ теоретичним способом, тому її значення знаходяться тільки експериментально. Експериментальне дослідження ежекторів із КЦКЗ у розрахункових режимах унаочнило, що для розглянутих ежекторів величина μ перебуває в межах 1,14...1,20, а для ежектора 2-2 у номінальному режимі за $t_g = 95^\circ\text{C}$, $t_k^{PP} = 33,0^\circ\text{C}$ і $t_0 = 12^\circ\text{C}$ значення μ дорівнює 1,17.

Під час змінювання температури генерації t_g ежектор із КЦКЗ переходить на нерозрахунковий режим роботи, що призводить до зміни площі перерізу s-s та потребує уточнення величини μ у крайніх точках діаграм, зображених на рис. 10. Аналіз дослідних та розрахункових даних показує, що з підвищенням та зменшенням t_g величина μ , відповідно, зростає та зменшується, а зміна t_0 суттєво не впливає на величину μ . Для ежектора 2-2 в межах діаграм, зображених на рис. 8, діапазон зміни величини μ дорівнює: для $t_g = 88^\circ\text{C}$ величина $\mu = 1,15$, для $t_g = 102^\circ\text{C}$ – $\mu = 1,2$.

Здобуті дані дають змогу рекомендувати вираз для розрахунку величини μ під час визначення максимального коефіцієнта ежекції у розрахунковому режимі:

$$\mu = 1 + \left(\frac{\beta - 1}{2} \right). \quad (11)$$

У четвертому розділі запропоновано використовувати експериментальні діаграми граничних режимів роботи ежектора для проектування автоматизованих ЕХМ, у яких за умови підтримання заданої температури кипіння t_0 зміна температури конденсації t_k внаслідок коливання температур довкілля компенсується відповідною зміною температури генерації t_g . Таке регулювання робочих параметрів ЕХМ, виконане в автоматичному режимі, забезпечує роботу ежектора на граничному режимі – з максимальною ефективністю та незначною зміною показників U , ζ та Q_0 , що значно підвищує ефективність та економічність машини в нерозрахункових умовах експлуатації.

Здобуті дані про енергетичні, експлуатаційні та техніко-економічні показники ЕХМ були використані для розроблення та проектування напівпромислових зразків високоєфективних ЕХМ різного призначення з холодопродуктивністю від 5 до 100 кВт. Головними перевагами розроблених ЕХМ є простота конструкції, низькі капітальні та експлуатаційні витрати, мінімальне обслуговування та витрати на ремонт, повна автоматизація, відсутність мастила і корозії, низький рівень шуму та відсутність вібрації, низька питома вартість виробленого холоду.

Провідними галузями раціонального застосування ЕХМ, що працюють на низькокиплячих речовинах, є:

– системи комфортного та технологічного кондиціонування, а в деяких випадках системи рефрижерації, що працюють за помірно низьких температур;

– підприємства та виробництва хімічної, металургійної, ливарної, харчової та переробної промисловості, які потребують холодильних машин малої та середньої холодопродуктивності для забезпечення холодом технологічних процесів та систем кондиціонування;

– децентралізовані тригенераційні системи, призначені для комбінованого виробництва електроенергії, теплоти та холоду і створені на базі двигунів внутрішнього згоряння та мікрогазотурбінних установок з одиначною електричною потужністю до 300...500 кВт;

– системи охолодження наддувного повітря двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних установок;

– системи охолодження природного газу, що транспортується по магістральних газопроводах;

– автотранспортні системи, призначені для створення комфортного мікроклімату в кабінах вантажних автомобілів, комбайнів, екскаваторів і тракторів, а також у салонах автобусів далекого прямування;

– каскадні та комбіновані компресорно-ежекторні та абсорбційно-ежекторні системи холодопостачання.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Уточнено математичну модель надзвукового ежектора під час його роботи в розрахункових і нерозрахункових режимах, яка забезпечує прогнозування характеристик і показників ежектора та ЕХМ з високою вірогідністю у широкому діапазоні режимних параметрів, що підтверджено належним ступенем узгодженості дослідних та розрахункових даних. Запропоновано новий метод розв'язання оптимізаційної задачі при визначенні максимального коефіцієнта ежекції, що дало змогу підвищити точність розрахунку на 15...18% порівняно з базовою методикою Є.Я. Соколова та Н.М. Зінгера.

2. Моделювання роботи ежектора й ЕХМ у режимі кондиціонування на різних низькокиплячих речовинах дозволило визначити найбільш перспективні з енергетичної, експлуатаційної та екологічної точок зору холодоагенти R245fa, R600, R600a та R601b.

3. Експериментально підтверджено, що застосування в ежекторі конічно-циліндричної камери змішування дає змогу підвищити значення величин U^{HP} , ζ^{HP} та Q_0^{HP} в середньому на 19...26 % порівняно із застосуванням в ежекторі циліндричної камери змішування за цих самих робочих умов.

4. Запропоновані та експериментально досліджені у роботі методи підвищення ефективності ЕХМ дали змогу у реальних умовах експлуатації розглянутих ежекторів та ЕХМ здобути експериментальні значення показників U та ζ у діапазонах 0,53...1,02 та 0,44...0,82 відповідно, що перевищує раніше досягнені показники ефективності для машин такого типу.

5. Розроблено базові рекомендації щодо оптимального проектування та конструювання ежекторів, які працюють на низькокиплячих речовинах.

6. Здобуті нові характеристики роботи ежектора на граничних режимах, що дає змогу значно підвищити ефективність ЕХМ у нерозрахункових умовах експлуатації.

7. Результати дисертаційної роботи є базою для подальшого розвитку наукових досліджень у напрямку створення холодильної техніки нового покоління. Вони відкривають реальні шляхи для виробництва в Україні ЕХМ різного призначення, які відповідають сучасним вимогам за енергетичними, економічними та екологічними показниками та можуть стати конкурентоспроможними на світовому ринку холодильних машин.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ 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. Разработка и исследование опытного образца эжекторной холодильной машины общего назначения [Текст] / В.А. Петренко, К.Б. Жук, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2005. – №2 (94). – С. 5–16.

Особистий внесок: розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

3. Петренко В.А. Сравнительный анализ показателей эффективности эжекторной холодильной машины, использующей различные легкокипящие рабочие вещества [Текст] / В.А. Петренко, И.Г. Чумак, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2005. – №5 (97). – С. 25–35.

Особистий внесок: формулювання математичної моделі ежектора, теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

4. Петренко В.А. Расчётно-теоретическое исследование судовой эжекторной холодильной машины [Текст] / В.А. Петренко, В.Х. Кириллов, и А.С. Воловик // Вестник Одесского национального морского университета. – 2005. – №18. – С. 155–171.

Особистий внесок: формулювання математичної моделі ежектора, теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

5. Петренко В.А. Теоретическое исследование эжекторной холодильной машины, работающей на хладагенте R141b [Текст] / В.А. Петренко, В.Х. Кириллов, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2006. – №2 (100). – С. 19–30.

Особистий внесок: формулювання математичної моделі ежектора, теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

6. Петренко В.А. Сопоставление экспериментальных и расчётных показателей и характеристик эжекторной холодильной машины, работающей на

хладагенте R141b. Часть 1. [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2006. – №5 (103). – С. 33–38.

Особистий внесок: опис експериментальної установки та методики проведення експериментів.

7. Петренко В.А. Сопоставление экспериментальных и расчётных показателей и характеристик эжекторной холодильной машины, работающей на хладагенте R141b. Часть 2 [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2006. – №6 (104). – С. 29–35.

Особистий внесок: розрахунок та порівняльний аналіз характеристик та показників ЕХМ, оброблення результатів.

8. Петренко В.А. Разработка и проектирование автоматизированных эжекторных холодильных машин, работающих на легкокипящих хладагентах [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2007. – №1 (105). – С. 41–47.

Особистий внесок: опис експериментальної установки та методики проведення експериментів, розроблення функціональної схеми автоматизації ЕХМ.

9. Петренко В.А. Анализ показателей и характеристик эжекторной холодильной машины, работающей в расчётных и нерасчётных условиях [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2007. – №2 (106). – С. 25–30.

Особистий внесок: формулювання математичної моделі ежектора, теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

10. Петренко В.А. Теоретическое исследование утилизационной полупромышленной эжекторной холодильной машины, предназначенной для охлаждения природного газа, транспортируемого по магистральным газопроводам [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик // Холодильная техника и технология. – 2008. – №3 (113). – С. 4–12.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

11. Petrenko V.O. Development and modeling of low-grade heat driven pilot ejector refrigeration machine operating with butane [Text] / V.O. Petrenko, O.S. Volovyk // International seminar on ejector/jet-pump technology and application, EURO THERM SEMINAR №85. – September 7-9, 2009. – Louvain-la-Neuve, Belgium.

Особистий внесок: розрахунок показників ЕХМ, оброблення результатів.

12. Petrenko V.O. Design and modeling of innovative solar ejector air conditioners and chillers operating with low-boiling working fluids [Text] / V.O. Petrenko, K.O. Shestopalov, O.S. Volovyk, V.O. Ierin, B.J. Huang // The proceedings of the International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EuroSun 2010). – 28 September - 1 October, 2010. – Graz, Austria.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників ЕХМ.

13. Petrenko V.O. Theoretical study and design of a low-grade heat-driven pilot ejector refrigeration machine operating with butane and isobutane and intended for cooling of gas transported in a gas-main pipeline [Text] / V.O. Petrenko, O.S. Volovyk // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, Issue 7. – pp. 1699 – 1706.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок показників ЕХМ, оброблення та оформлення результатів.

14. 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: розроблення схем тригенераційних і комбінованих ЕХМ.

15. 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: формулювання математичної моделі ежектора.

16. Петренко В.А. Исследование эжекторной холодильной машины на хладагенте R245fa в расчётных и нерасчётных режимах. Часть 1. [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик, К.А. Шестопалов, В.Ж. Хуанг // Холодильная техника и технология. – 2012. – №2 (136). – С. 21–28.

Особистий внесок: опис експериментальної установки та методики проведення експериментів.

17. Петренко В.А. Исследование эжекторной холодильной машины на хладагенте R245fa в расчётных и нерасчётных режимах. Часть 2. [Текст] / В.А. Петренко, А.С. Воловик, К.А. Шестопалов, В.Ж. Хуанг // Холодильная техника и технология. – 2012. – №4 (138). – С. 26–35.

Особистий внесок: теоретичний розрахунок та порівняльний аналіз характеристик та показників ЕХМ, оброблення результатів.

АНОТАЦІЯ

Воловик О.С. Удосконалення характеристик та показників ежекторної холодильної машини, що працює на низькокипячих речовинах. – 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 підвищення ефективності ежекторів та тепловикористальних ежекторних холодильних машин, що працюють на низькокипячих речовинах.

Визначені та проаналізовані перспективні методи підвищення ефективності ежекторних холодильних машин. Проведено експериментальне дослідження ежекторної холодильної машини холодопродуктивністю 10,5 кВт на холодильному агенті R245fa у широкому діапазоні робочих параметрів та геометричних характеристик ежектора. Доведено, що для ежекторів з незмінними геометричними розмірами проточної частини режим максимальної ефективності має місце не тільки у розрахунковому, але й у нерозрахункових режимах. Надано рекомендації щодо проектування та конструювання ежекторів, які працюють на низькокиплячих холодоагентах, визначено галузі раціонального застосування ЕХМ.

Ключові слова: ежектор, ежекторна холодильна машина, енергосбереження, утилізація, вторинні енергетичні ресурси, тригенерація.

АННОТАЦИЯ

Воловик А.С. Совершенствование характеристик и показателей эжекторной холодильной машины, работающей на низкикипящих веществах. – 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 повышения эффективности эжекторов и теплоиспользующих эжекторных холодильных машин, работающих на низкикипящих веществах. Проведенное исследование обусловлено повышенной актуальностью вопросов экономии энергоносителей и охраны окружающей среды путем энергосбережения и эффективного использования вторичных энергетических ресурсов.

Рассмотрено современное состояние вопроса в области совершенствования эжекторных холодильных машин, работающих на воде и низкикипящих хладагентах. Аналитическим и экспериментальным путём определены и исследованы наиболее перспективные методы повышения эффективности эжекторных холодильных машин.

Проведено экспериментальное исследование эжекторной холодильной машины холодопроизводительностью 10,5 кВт на хладагенте R245fa в широком диапазоне рабочих параметров и геометрических характеристик эжектора. Доказано, что для эжектора с неизменными геометрическими размерами проточной части режим максимальной эффективности имеет место не только при одном единственном расчетном режиме, но и в нерасчетных условиях – при определенном сочетании рабочих параметров, обеспечивающих работу эжектора на предельном режиме. На базе анализа полученных экспериментальных характеристик разработаны методы автоматического регулирования основных пара-

метров эжекторной холодильной машины, которые позволяют значительно повысить её эффективность и экономичность при эксплуатации в нерасчётных условиях и основаны на контроле и автоматическом выборе оптимальных сочетаний рабочих температур, обеспечивающих работу эжектора на предельном или предельном режиме.

Даны рекомендации по проектированию и конструированию эжекторов, работающих на низкикипящих хладагентах, определены области рационального применения ЭХМ.

Результаты работы представляют практический интерес для производителей холодильного оборудования при проектировании и создании теплоиспользующих эжекторных холодильных машин, отвечающих современным требованиям по энергетическим, экологическим и экономическим показателям.

Ключевые слова: эжектор, эжекторная холодильная машина, энергосбережение, утилизация, вторичные энергетические ресурсы, тригенерация.

ABSTRACT

Volovyk O.S. Improvement of characteristics and performances of an ejector refrigeration machine operating with low-boiling working fluids. – 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 efficiency improvement of ejectors and heat-driven ejector refrigeration machines operated with low-boiling working fluids.

The results of a theoretical investigation of the performance characteristics of an ejector and ejector cooling machine at design and off-design conditions are provided. An ejector test rig is developed and experimental results at various operating conditions are presented and evaluated. It is proven that for ejector with fixed flow part geometry maximum of efficiency could be reached not only for design conditions but also for some of off-design conditions.

Keywords: ejector, ejector refrigeration machine, energy saving, utilization, waste energy, trigeneration.

Підписано до друку 07.09.2013 р. Формат 60/84/16. Папір офсетний.
Замовлення №1435. Тираж - 100 прим.
Надруковано у сервісно-поліграфічному центрі "Європрінт"
65044, м. Одеса, вул. Канатна, 101/2