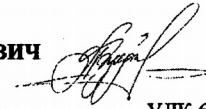


Автореферат  
Б94

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БУЯДЖИ ОЛЕКСІЙ ДМИТРОВИЧ



УДК 621.574

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОТРАНСФОРМАЦІЇ  
В АВТОНОМНИХ ЕЖЕКТОРНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИНАХ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в інституті холоду, криогенних технологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Артеменко Сергій Вікторович**,  
професор кафедри інформаційних систем  
та мереж 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

доктор технічних наук, професор  
**Нікульшин Володимир Русланович**,  
завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної  
енергетики Одеського національного політехнічного  
університету МОН України

Захист дисертації відбудеться « 29 » лютого 2016 р. о 13<sup>00</sup> в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої  
ради Д 41.088.03 при ОНАХТ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

можна ознайомитись у бібліотеці Інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики  
Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул.  
Україна, 65082.

V.I. Міланов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом споживання електроенергії на виробництво холоду зростає прискореним темпом, особливо це стосується процесів кондиціонування повітря та зберігання харчових продуктів, що, насамперед, негативно позначається на стані довкілля. Тому стає нагальною задачею створення надійних та економічних теплоспоживаючих генераторів холоду, до яких належать ежекторні холодильні машини (ЕХМ). Проблема ЕХМ полягає в відсутності надійного та ефективного пристрою, який подає рідкий холодоагент з конденсатора до парогенератора. В цій роботі вперше створено та досліджено надійну та економічну систему живлення на базі термонасоса гравітаційного типу, яка має широкий спектр використання не лише в холодильній та криогенній галузях, але і в органічних циклах Ренкіна (ОЦР), зокрема, в геотермальних електростанціях тощо.

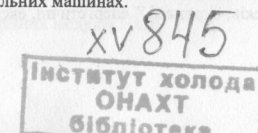
Актуальність виконаної роботи полягає у вирішенні проблеми енергозбереження шляхом створення автономних ЕХМ, які будуть здатні вивільнити загалом понад 2% електропотужностей в світовому масштабі, а також знизити відповідну кількість шкідливих викидів, в першу чергу, парникових газів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно Закону України №74/94-ВР «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р., Закону України №2509-IV «Про комбіноване використання теплової та електричної енергії (когенерація) та використання відхідного потенціалу» від 05.04.2005 р., Постановою Кабінету Міністрів України №2274-11 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року від 22.02.2001р., а також завдання № 53 «Нове покоління систем сонячного охолодження та опалення» Програми з сонячного опалення та охолодження Міжнародної енергетичної агенції (ІЕА).

Автор роботи є учасником низки міжнародних проектів та програм, зокрема: завдання № 48 та 53 Програми з сонячного опалення та охолодження (ІЕА-SHC); програми EBTC/GBI зі створення сонячних фруктосховищ для умов Індії (Бангалор, Індія); проекту IWT (Штутгарт, Німеччина) з впровадження сонячних фруктосховищ на базі ЕХМ в Західній Африці (Дакар, Сенегал); проекту Coolerado Inc. (Денвер, США) та Seeley International (Аделаїда, Австралія) зі створення гібридних кондиціонерів на базі циклу Майсоценка та ЕХМ; проекту DLRE (Сінгапур) зі створення когенераційної системи для рекреаційних об'єктів з використанням ЕХМ (Мальдіви, Шрі-Ланка, Маврій); проекту Кіушу Університету (Фукуока, Японія) зі створення гібридного ежекторно-адсорбційного кондиціонера з використанням випарного охолоджувача, який працює за принципом циклу Майсоценка.

**Об'єктом дослідження** є автономна ежекторна холодильна машина (ЕХМ).

**Предметом дослідження** є термодинамічні та гідродинамічні процеси, параметри та показники ефективності термотрансформації в автономних ежекторних холодильних машинах.



**Мета та завдання дослідження.** Метою цієї роботи є розроблення і дослідження автономної ЕХМ з термонасосом гравітаційного типу та розширення сфер використання ежекторних технологій на базі нових схемно-циклових рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *наукові завдання*:

- проаналізувати існуючі системи трансформації низькопотенційної теплоти в ЕХМ, виявити резерви та розробити дієві способи підвищення їх ефективності шляхом раціональної організації процесів у прямому та зворотному циклах;
- розробити гравітаційний термонасос для подачі рідкого холодоагенту до парогенератора ЕХМ та провести його експериментальні дослідження у складі автономної ЕХМ на R-142b в режимі кондиціювання повітря;
- визначити швидкісні коефіцієнти для вуглеводнів та їх похідних на прикладі R-142b, R-600a, R-245ca, R-152a та на їх основі розробити єдину методику розрахунку коефіцієнту ежекції та геометричних характеристик проточної частини ежектора, яка може бути застосована для однокомпонентного, біагентного та мультикомпонентного ежекторів;
- удосконалити систему автоматичного регулювання параметрів ЕХМ, визначити принципи відбору холодоагентів для ЕХМ та бінарної ЕХМ (БЕХМ) та систематизувати, за способом використання в БЕХМ, холодоагенти, які забезпечують енергетично ефективну та стапу роботу в широкому діапазоні температурних режимів.

**Методи дослідження:** теоретичний аналіз роботи різних типів ЕХМ, комп'ютерне моделювання гідродинамічних процесів в ежекторі та термонасосі гравітаційного типу, експериментальні дослідження термонасоса та автономної ЕХМ, порівняння отриманих експериментальних результатів ефективності ЕХМ з теоретичними та уточнення програми розрахунку коефіцієнта ежекції. Енергетичні показники ЕХМ обчислювались за розробленою методикою, адекватність отриманих результатів підтверджено експериментальними даними.

**Наукова новизна отриманих результатів, які захищає автор.** У роботі *вперше* отримані наступні наукові результати:

- виявлено додаткові резерви підвищення ефективності та експлуатаційної надійності автономних ЕХМ шляхом використання термонасоса гравітаційного типу, застосування бінарних та мультикомпонентних сумішей холодоагентів, скорочення енергетичних втрат при роботі ЕХМ на позарозрахункових режимах, комбінування ежекторних систем з іншими технологіями трансформації енергії, використання систем ступеневої та ступенево-каскадної трансформації теплоти в ЕХМ, однопоточних каскадних циклів та запропоновані способи їх реалізації;
- експериментально досліджено гравітаційну систему живлення парогенератора ЕХМ рідким холодоагентом R-142b, яка споживає лише 2-3% робочої пари та працює в широкому діапазоні тисків; отримані її енергетичні, експлуатаційні та конструктивні характеристики;

- встановлено, що швидкісні коефіцієнти робочого сопла, приймальної камери, змішувальної камери та дифузору ежектора залежать від роду холодоагенту, отримані раніш невідомі швидкісні коефіцієнти для низькі холодоагентів, зокрема, R-142b, R-600a, R-245ca та R-152a, з урахуванням чого розроблено єдину методику розрахунку коефіцієнта ежекції ЕХМ та геометричних параметрів проточної частини однокомпонентного, біагентного та мультикомпонентного ежекторів;
- запропоновано та реалізовано принципи автоматичного компенсаторного регулювання параметрів при експлуатації ЕХМ в розрахункових та позарозрахункових режимах;
- встановлено, що відбір холодоагентів для ЕХМ з позицій отримання максимального коефіцієнта ежекції здійснюється за принципом оптимального співвідношення коефіцієнтів стиснення робочої та ежекторної речовин, яке має наближатися до 1, що дозволило класифікувати низку найбільш придатних для використання в ЕХМ холодоагентів;
- запропоновано та досліджено комбіновані термодинамічні цикли ЕХМ з компресорно-детандерними циклами для скраплення природного газу в стаціонарних умовах та на судах-газовозах, що дозволяє скоротити споживання енергії в 3-4 рази.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** в аналітичному плані забезпечено коректною постановкою науково-прикладних завдань дослідження, залученням сучасних теоретико-обчислювальних методів дослідження; в експериментальному сенсі - побудовою комп'ютерних моделей надзвучкових ежекторів та співставленням теоретичних і експериментальних результатів, використанням методів розрахунку, що базується на зіставленні з власними експериментальними даними і результатами попередніх досліджень, достатнім узгодженням розрахункових та експериментальних даних, використанням сучасних засобів вимірювання, що забезпечують максимально можливу точність експериментальних досліджень, оцінкою похибки вимірювань за стандартами ISO.

**Наукове значення роботи** полягає в розвиненні газодинамічної теорії струменевих апаратів в частині створення єдиної методики розрахунків напірно-витратних характеристик ежектора разом з вибором раціональних параметрів та ефективних і безпечних холодоагентів для ЕХМ.

**Практичне значення отриманих результатів** має:

- визначення областей раціонального використання ЕХМ, які працюють на чистих речовинах, азеотропах, а також на зеотропах та гетероазеотропах, завдяки чому можлива організація виробництва та випуска пілотних взірців та партій ЕХМ;
- застосування єдиної інженерної методики розрахунку напірно-витратних характеристик ежектора ЕХМ, яка за точністю результатів наближена до комп'ютерної моделі та експериментальних даних;
- визначення індивідуальних швидкісних коефіцієнтів, яке дозволяє користуватися програмою розрахунків, розробленою за універсальним алгоритмом, і таким чином отримувати більш достовірні розрахункові показники, а також економити час при проектуванні різних модулів ЕХМ.

- використання рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів циклу ЕХМ та холодоагентів за співвідношенням коефіцієнтів стиснення у прямому та зворотному циклах як показнику довершеності напірно-виртратної характеристики ЕХМ в досягненні максимального коефіцієнта ежекції;

- розроблення та дослідження гравітаційного термонасоса, в якому відсутні рухомі частини, не відбувається перетікання рідини з нагнітальної порожнини до всмоктуючої, відсутня кавітація, який є довговічним та надійним в експлуатації та може бути використаний в паросилових системах, особливо на легкокиплячих течких речовинах, в тому числі в органічних циклах Ренкіна, абсорбційних, детандерно-компресорних та струменевих термотрансформаторах, в хімічних виробництвах для перекачування агресивних речовин в широкому діапазоні тиска, а також у криогенній техніці та мультигенераційних енергетичних системах.

Результати роботи, а саме методики розрахунку раціональних параметрів, комп'ютерні моделі та креслення, використані при створенні та проектуванні експериментальної ЕХМ (ТОВ «Вілсон», м. Одеса), а також задіяні в науково-дослідній роботі студентів, в дипломному проектуванні магістрів та спеціалістів ОНАХТ та ОНМА, починаючи з 2012 року. В курсі лекцій та семінарах на кафедрі «Судові енергетичні системи» ОНМА присутні деякі розділи на базі проведених в цій роботі досліджень.

**Апробація роботи.** Основні результати отримали позитивну оцінку на 23 міжнародних симпозіумах, серед яких: 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Сталий розвиток та штучний холод» (Одеса, Україна, 2012 р.); 9-а міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (Одеса, Україна, 2013 р.); міжнародний семінар з ежекторних технологій та їх використання "Eurotherm 85" (Лув'ян, Бельгія, 2009 р.); 5-а Азійська конференція з холодопостачання та кондиціювання повітря ACRA 2010 (Токіо, Японія, 2010 р.); 21-й всесвітній конгрес з енергетики (Монреаль, Канада, 2010 р.); 11-й всесвітній конгрес з поновлювальних джерел енергії (Абу-Дабі, ОАЕ, 2010 р.); 9-а міжнародна конференція зі сталих технологій в енергетиці SET 2010 (Шанхай, Китай, 2010 р.); 23-й міжнародний конгрес з холоду (Прага, Чехія, 2011 р.); міжнародна конференція з інженерних розробок для сталого розвитку (Каїр, Єгипет, 2010 р.); 10-а міжнародна конференція зі сталих технологій в енергетиці SET 2011 (Стамбул, Туреччина, 2011 р.); 1-а міжнародна конференція з сонячного опалення та охолодження для будівель та промисловості SHC 2012 (Сан-Франциско, США, 2012 р.); 11-а міжнародна конференція зі сталих технологій в енергетиці SET 2012 (Ванкувер, Канада, 2012 р.); 5-а міжнародна конференція з криогенних технологій та холодильної техніки (Хангжоу, КНР, 2013 р.); 4-а міжнародна конференція з термодинамічних властивостей та процесів теплопередачі холодоагентів (Дельфт, Нідерланди, 2013 р.); 3-й міжнародний симпозіум з ексергії, оцінки життєвого циклу та сталості, ELCAS3 (Нісірос, Греція, 2013 р.); 2-а міжнародна конференція з сонячного опалення та охолодження для будівель та промисловості SHC 2013 (Фрайбург, Німеччина, 2013 р.); 3-я

міжнародна конференція з елементами наукової школи «Інноваційні розробки в області техніки та фізики низьких температур» (Москва, РФ, 2013 р.); 13-а міжнародна конференція зі сталих технологій в енергетиці SET 2014 (Женева, Швейцарія, 2014 р.); міжнародний конгрес з інженерної механіки та машинобудування ASME 2014 (Монреаль, Канада, 2014 р.); 1-а конференція з термогідравлики ASTFE (Нью-Йорк, США, 2015 р.); 14-а міжнародна конференція зі сталих технологій в енергетиці SET 2015 (Ноттінгем, Велика Британія, 2015 р.); 24-й міжнародний конгрес з рефрижерачії ICR-2015 (Йокогама, Японія, 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 24 друкованих наукових робіт, в тому числі 6 статей в спеціалізованих виданнях, та 18 доповідей/тез доповідей.

**Особистий внесок автора** підтверджений публікаціями, в яких наведені основні наукові та прикладні результати роботи. В сумісних публікаціях автору належать наступні результати: розробка способів підвищення ЕХМ, систем функціонування автономних ЕХМ для різних умов, проведення теоретичного аналізу тепловикористовуючих термотрансформаторів, розробка експериментального стенда та проведення експериментів. Автором розроблений універсальний алгоритм та програма розрахунку коефіцієнта ежекції та геометрії проточної частини ежектора, створені CFD-моделі ежекторів різної напірності. Проведено узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, сформульовані наукові та прикладні результати на висновки, які винесено до захисту.

За матеріалами дисертації опубліковані 6 наукових статей в професійних періодичних виданнях, рекомендованих ВАК України журналах «Холодильна Техніка і Технологія», «International Journal of Low Carbon Technologies» (Oxford University Press), «Energy Procedia» (Elsevier), «International Journal Of Energy For A Clean Enviroment» (Begell House), отримано та опубліковано 7 патентів України на винаходи та 1 міжнародна заявка РСТ, а також 18 друкованих робіт у збірниках наукових праць міжнародних конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів та висновків. В додатках наведені результати допоміжних розрахунків та документи, які підтверджують впровадження основних результатів досліджень.

**Обсяг дисертації** складає 234 сторінки друкованого тексту, 29 сторінок додатків, 97 малюнків та 45 таблиць. Бібліографія містить 171 найменувань на 19 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані цілі та завдання досліджень, наукові результати та наукова новизна досліджень, практичне значення отриманих результатів та перспективи розвитку обраного напрямку досліджень, наведено перелік наукових публікацій автора, винаходів та відомості про апробацію теоретичних та експериментальних досліджень.

У першому розділі наведено огляд публікацій за останні 50 років, які присвячені дослідженню та практичному використанню ЕХМ. Враховуючи, що найбільш дослідженими на сьогоднішній день є пароводяні ЕХМ, кількість робіт, які фокусують увагу на ЕХМ, що працюють на легкокиплячих речовинах, обмежена. Фокус уваги дослідників в усьому світі останнім часом зосередився на створенні комп'ютерних моделей ежектора, а також ускладненнями конструкції ежектора, що не призводить до більш - менш суттєвого підвищення ефективності, але позбавляє ежектор його головної переваги – простоти та надійності. Звісно, в цілому ці дослідження не є марними, вони крок за кроком в якомусь сенсі поліпшують наші уявлення про процеси в ежекторі, особливо цінними є дослідження проф. Я. Бартошевича (Бельгія), які стосуються стрибків ущільнення та ударних хвиль в змішувальній камері, але більш вагомих результатів наразі не спостерігається, про що красномовно свідчить відсутність будь-якого впровадження ЕХМ.

Слід зазначити, що поштох всім дослідженням невіданих ЕХМ в СРСР зроблено В.С. Мартиновським, який вважається засновником наукової школи також і в цьому напрямку науки. Головні персоналії цієї школи є безпосередні його аспіранти, здобувачі та їх послідовники.

Розглянута також проблема енергоспоживання на наступні 30-35 років за різними сценаріями з урахуванням зростання економіки та соціальних стандартів у країнах третього світу та прискореним переходом на використання альтернативних джерел, а також перспективи розвитку ежекторних технологій.

У другому розділі висловлені основні наукові гіпотези щодо вирішення нагальних проблем впровадження ЕХМ. До цих гіпотез належать такі:

- найбільш доцільним для ЕХМ є гравітаційний термонасос, який корелює з позитивними якостями ЕХМ, тобто простий, дешевий, надійний та довговічний;
- підвищення ефективності ЕХМ полягає, насамперед, в зниженні найбільш вагомих втрат, якими в ежекторі є втрати енергії внаслідок непружного удару струменів з різними початковими швидкостями;
- швидкісні коефіцієнти елементів проточної частини ежектора є індивідуальними характеристиками робочої речовини;
- співвідношення коефіцієнтів стиснення робочого та ежектованого потоків впливає на коефіцієнт ежекції таким чином, що кращим є рівність цих коефіцієнтів;

- одним з пріоритетних напрямків розвитку ЕХМ є пошук нових робочих речовин та їх сумішей, які б відповідали критеріям безпеки та мали високі теплофізичні характеристики;

Загальна концепція гравітаційного термонасоса відома вже багато років, її намагалися втілити багато авторів, але результати були невтішними, найчастіше – негативними, що призвело до висловлення вироку, що такі термонасоси непридатні для роботи. Аналіз нових конструкцій такого термонасоса показав, що доопрацювання схеми, внесення простих, але конче необхідних змін до конструкції перевтілив цей термонасос та зробив його незамінним для ЕХМ. Подальші експериментальні дослідження підтвердили висунуту гіпотезу та довели її слушність.

Аналіз впливу втрат енергії від удару показав, що існує межа, нижче якої зниження цих втрат призводить до зниження теплового коефіцієнта ЕХМ внаслідок превалюючого зниження коефіцієнта ежекції.

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{U \left( \sqrt{\frac{2kP_r V_r}{k-1} \left(1 - \Pi_r^{\frac{k-1}{k}}\right)} - \sqrt{\frac{2kP_0 V_0}{k-1} \left(1 - \Pi_0^{\frac{k-1}{k}}\right)} \right)^2}{\frac{2U^2 k P_0 V_0}{k-1} \left(1 - \Pi_0^{\frac{k-1}{k}}\right) + \frac{2kU}{k-1} \left(P_r V_r \left(1 - \Pi_r^{\frac{k-1}{k}}\right) + P_0 V_0 \left(1 - \Pi_0^{\frac{k-1}{k}}\right)\right) + \frac{2kP_r V_r}{k-1} \left(1 - \Pi_r^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (1)$$

де  $\Delta E$  – втрати енергії на удар,  $E_m$  – підведена енергія,  $U$  – коефіцієнт ежекції,  $k$  – показник адиабати відповідного потоку,  $\Pi_r$ ,  $\Pi_0$  – ступінь розширення робочого та ежектованого потоків,  $P_0$ ,  $P_r$  – тиск ежектованого та робочого потоків,  $V_0$ ,  $V_r$  – питомий об'єм ежектованого та робочого потоків,  $m^3/kg$ .

Якщо намагатися зменшувати  $\Delta E \Rightarrow 0$ , то це означає, що  $U$  має також  $\Rightarrow 0$ , тому що інші складові рівняння мають свої кінцеві значення та залежать лише від роду речовини та режиму роботи. Таким чином встановлюється оптимальне значення  $\Delta E$ , при якому досягається найбільше значення  $U$  (рис.1).

Якщо прирівняти першу похідну функції  $dU/d(\Delta E) = 0$ , та обчислити другу похідну  $d^2U/d(\Delta E)^2$ , яка є від'ємною величиною, тоді  $U \Rightarrow U_{max}$ . В нашому випадку друга похідна функції дорівнює  $\frac{2kP_0 V_0}{k-1} \left(1 - \Pi_0^{\frac{k-1}{k}}\right)$ , тобто є від'ємною.

Наявність втрат енергії на удар та змішування потоків властиві саме ЕХМ та цим відрізняє її від сталонного компресорно-детандерного тепловикористовуючого термотрансформатора, який в зв'язку з цим має найвищі енергетичні показники.

Але ці переваги зводяться майже нанівець ускладненням компресорно-детандерного агрегату, проблемами змащення, втрат від тертя, великих швидкостей обертання та міцності деталей, а також високої звукової емісії цього агрегату.

Відсутність рухомих частин, виключна простота та відносно низька ціна, висока надійність та простота обслуговування ЕХМ компенсують дещо зниженими енергетичними показниками, які, однак, ще мають резерви до підвищення.

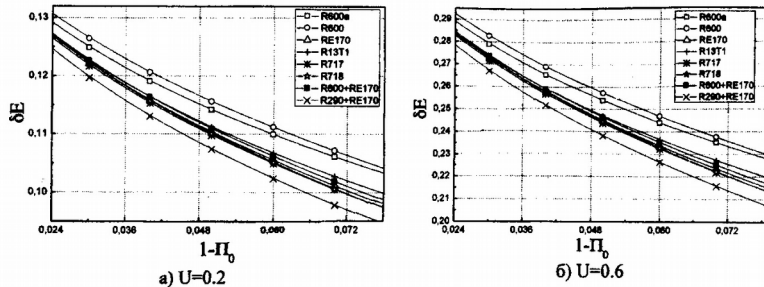


Рис. 1. Залежність втрат енергії на удар від тиску в приймальній камері при різних значеннях коефіцієнта ежекції.

Тепловий коефіцієнт ЕХМ з механічним насосом визначається наступним рівнянням:

$$\zeta = \frac{Q_{охл}}{Q_{охл} + W_{мех.насос} / \eta_{Карно}} = U \frac{q_{охл}}{q_{охл} + \int w dP / (\eta_{Карно} \eta_{мех.насос})} \quad (2)$$

де  $\zeta$  - тепловий коефіцієнт ЕХМ,  $Q_{охл}$  - холодопродуктивність (кВт),  $Q_{охл}$  - витрати тепла в парогенераторі ЕХМ (кВт),  $W_{мех.насос}$  - витрати роботи на механічний насос (кВт),  $\eta_{Карно}$  - термічний ККД цикла Карно,  $\eta_{мех.насос}$  - ККД механічного насоса,  $q_{охл}$  - питома холодопродуктивність (кДж/кг),  $q_{охл}$  - питомі витрати тепла в парогенераторі ЕХМ (кДж/кг),  $U$  - коефіцієнт ежекції.

В разі використання термонасоса гравітаційного типу тепловий коефіцієнт має наступний вигляд

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_{р,зж} + Q_{р,н}} = \frac{G_0 q_0}{G_{р,зж} q_p + G_{р,н} q_p} = U \frac{q_0}{q_p} \frac{1}{1 + G_{р,н} / G_{р,зж}} = \frac{q_0}{q_p} \frac{U}{1 + a} \quad (3)$$

$$a = G_{р,н} / G_{р,зж} \quad (4)$$

$$G_{р,н} = V_n \rho_p / \tau_n \quad (5)$$

де  $\tau_n$  - тривалість циклу (с),  $V_n$  - об'єм термонасоса ( $m^3$ ),  $\rho_p$  - щільність робочої пари ( $кг/m^3$ ),  $Q_0$  - холодопродуктивність (кВт),  $Q_{р,зж}$ ,  $Q_{р,н}$  - витрати робочої пари на роботу ежектора та термонасоса відповідно (кВт),  $G_0$ ,  $G_{р,зж}$ ,  $G_{р,н}$  - витрати холодоагенту на випарник, ежектор та термонасос відповідно (кг/с).

Слід зауважити, що  $a$  складає незначну величину та в більшості випадків коливається між значеннями 0,02-0,1, тобто тепловий коефіцієнт з термонасосом наближається до теплового коефіцієнту без урахування насоса.

Гіпотеза зниження втрат енергії на удар привела до ідеї використання бінарних сумішей холодоагентів, які, в свою чергу, утворюють між собою зетропи, азеотропи та гетероазетропи, що істотно впливає на показники ЕХМ. Аналіз низки речовин та їх сумішей надали можливість створити діаграму, яка показує доцільність використання тих чи інших речовин та їх сумішей. Отримані

уточнені дані про властивості HFE-7500 надали можливість вирахувати енергетичні показники ЕХМ на суміші даного ефіру з водою та побудувати порівняльну діаграму преференційного застосування ЕХМ різних типів в залежності від температури генерації та конденсації (рис.2).

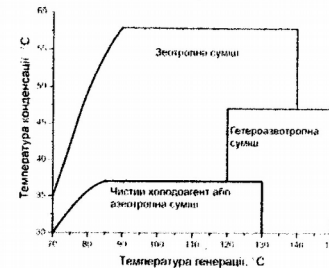


Рис. 2. Діаграму преференційного застосування ЕХМ різних типів в залежності від температури генерації та конденсації.

Для отримання практичних результатів в даній роботі сформульовано принцип регулювання за рахунок підтримки рівноважності ежектора при зміні температури конденсації, що значно розширило діапазон регулювання параметрів в межах одного ежектора. Розрахунки для різних холодоагентів показують майже ідентичні результати в однакових температурних режимах. Якщо не компенсувати ці зміни, то  $\zeta$  при підвищенні температури конденсації бодай на 3-5°C впаде би на 90%. Отримані результати лягли в основу розробки системи автоматизації, без чого ЕХМ, особливо при роботі від сонячного тепла, була б непрацездатною.

Для проектування проточної частини ежекторів необхідно використовувати математичну модель, яка базується на рівняннях, що описують перехід від пристінкового руху до турбулентного в ядрі потоку, а також наявність стрибків ущільнення та ударних хвиль. Показано, що для розглянутих параметричних умов найточнішим виявились рівняння моделі SST (Shear Stress Transport), які можуть передвіщати початок відриву та кількість потоку при несприятливих перепадах тиску.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження гравітаційного термонасоса та автономної ЕХМ на R-142b в режимі кондиціонування повітря наводяться порядок та методика проведення експериментальних та модельних досліджень швидкісних коефіцієнтів елементів проточної частини ежектора, отримання експериментальних характеристик гравітаційного термонасоса та автономної ЕХМ в цілому як в розрахунковому, так і в позарозрахункових режимах.

За допомогою аналізу CFD-моделі ежектора визначені швидкісні коефіцієнти елементів проточної частини ежектора для низки холодоагентів та двох робочих режимів. Встановлено, що швидкісні коефіцієнти залежать від роду холодоагенту, але залежність від робочих параметрів майже не простежується.

Швидкісний коефіцієнт показує співвідношення дійсної кількості руху потоку до теоретичного

$$\varphi_i = \frac{\sum G_i W_i}{\sum G_{i, теор} W_{i, теор}} \quad (6)$$

Реальні параметри потоків визначалися на моделі ежектора, де враховуються будь-які гідродинамічні втрати (рис. 3, 4).

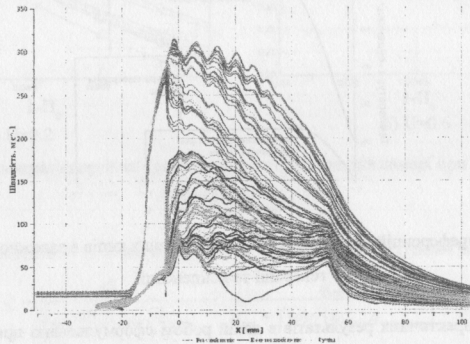


Рис. 3. Зміна швидкості потоків в проточній частині ежектора

На основі проведених досліджень визначені швидкісні коефіцієнти, коефіцієнти ежекції та теплові коефіцієнти (табл. 1).

Аналогічні дані отримані також на режимі  $t_{ген}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{конд}=30^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{вип}=5^{\circ}\text{C}$ . Відмінності не перевершують 0,03-0,05%, тобто знаходяться в межах допустимої похибки. За розробленою програмою експериментальних досліджень проведено кілька серій випробувань, які надали можливість оптимізувати час наповнення та випорожнення порожнини термонасоса, виходячи з конструктивних параметрів парогенератора та парогенератор, який нагрівається гарячою водою, циркулюючою між ним та бойлером з електронагрівачем; ежектор (рис. 5), в якому передбачено

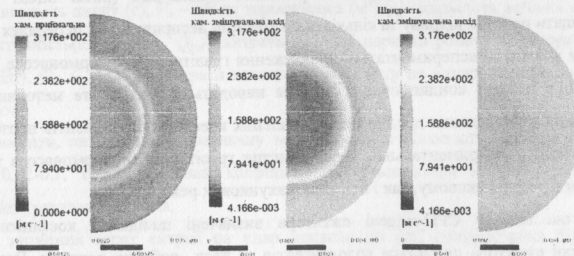


Рис. 4. Перерізи ежектора в приймальній камері, на вході в циліндричну камеру змішування, та на виході з циліндричної камери.

Таблиця 1.

Швидкісні коефіцієнти, коефіцієнти ежекції та теплові коефіцієнти. Режим  $t_{ген}=85^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{конд}=35^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{вип}=12^{\circ}\text{C}$

| Параметри                          | ВОДА  | R142b за ВОДОЮ | R142b  | R600a за ВОДОЮ | R600a  | R152a за ВОДОЮ | R152a  | R245c а за ВОДОЮ | R245c а |
|------------------------------------|-------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|------------------|---------|
| $\varphi_1$                        | 0.95  | 0.95           | 0.9502 | 0.95           | 0.9508 | 0.95           | 0.955  | 0.95             | 0.953   |
| $\varphi_2$                        | 0.975 | 0.975          | 0.9752 | 0.975          | 0.9755 | 0.975          | 0.9753 | 0.975            | 0.977   |
| $\varphi_3$                        | 0.9   | 0.9            | 0.9064 | 0.9            | 0.913  | 0.9            | 0.915  | 0.9              | 0.911   |
| $\varphi_4$                        | 0.925 | 0.925          | 0.9255 | 0.925          | 0.926  | 0.925          | 0.926  | 0.925            | 0.928   |
| U                                  | 0.304 | 0.469          | 0.4801 | 0.473          | 0.4977 | 0.429          | 0.4648 | 0.454            | 0.4732  |
| COP                                | 0.288 | 0.381          | 0.3895 | 0.358          | 0.3765 | 0.387          | 0.4184 | 0.344            | 0.3578  |
| Граничний режим                    | 1     | 3              | 3      | 3              | 3      | 3              | 3      | 1                | 1       |
| $T^{\circ}(\text{K})$ за ежектором | 338   | 322            | 322.2  | 325            | 324.5  | 312.7          | 312.3  | 329.7            | 329.9   |

вісне переміщення сопла та можливість змінювати проточну частину ежектора; кожухотрубний конденсатор водяного охолодження, випарник пластинчатого типу, термонасос гравітаційного типу з системою зворотних хлипаків та соленоїдних вентилів, мірна судина, дросельний вентиль, візрєві манометри, термомари, щит управління з необхідним електрообладнанням та насос гарячої води.

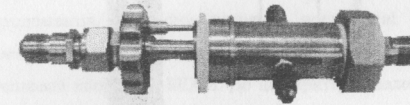


Рис. 5. Експериментальний ежектор (фото автора)

Цей стенд (рис. 6) використовувався для випробування як окремо термонасоса (рис. 7), так і автономної EXM в цілому.

При випробуванні термонасоса визначалась кількість тепла, яка витрачається при його функціонуванні за один цикл та порівнювалась з даними моделі термонасоса, проводилась мінімізація цих втрат розрахунковим шляхом та даними експерименту.

$$Q = f(\delta, a, Fo, c_p, \lambda, \tau, \mu, Bi, La) \quad (7)$$

В результаті випробувань встановлена залежність COP термонасоса від температури генерації та температури конденсації, а також від їх співвідношення і властивостей робочої речовини.

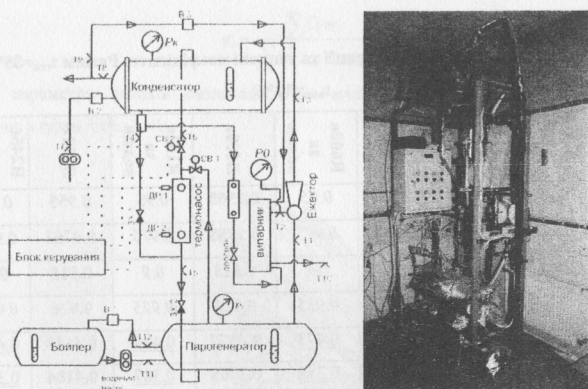
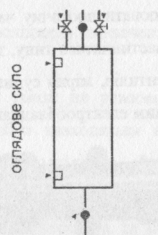


Рис. 6. Схема та фото (автора) експериментальної установки. В1-В3 – витратомір; Т1-Т10 – датчик температури; ДР1, ДР2 – датчик рівня; 3Х1, 3Х2 – зворотний клапан; СВ1, СВ2 – соленоїдний вентиль;  $P_1$ –манометр парогенератору;  $P_6$ –манометр випарника;  $P_к$ –манометр конденсатору.

соленоїдний вентиль



зворотний хлипак



Рис. 7. Схема та фото (автора) експериментального термонасоса.

Використання внутрішньої ізоляції в порожнині термонасоса має вирішальний вплив на працездатність та зменшення втрат тепла. Наявність ізоляції мінімізує нагрівання та охолодження внутрішньої стінки порожнини термонасоса, що в свою чергу зменшує або виключає процес пароутворення в ній, тобто відносно стабілізує коливання температури стінки. При визначенні теплових потоків, які виносяться з паром до конденсатора, вирішувалась система рівнянь нестационарної теплопровідності з внутрішнім джерелом тепла, який змінюється з часом. Модель термонасоса дозволила отримати втрати тепла та розподіл температур стінки в усіх періодах циклу. Порівняння даних моделі з експериментальними даними дало високу ступінь співпадіння з розбіжністю менше 1%.

Виконання першої серії експериментів проводилось при непрацюючому випарнику, а ежектор виконував роль дроселя з каліброваним отвором, яким є критичний переріз сопла.

Випробування автономної ЕХМ полягали в експериментальному визначенні енергетичних характеристик системи та порівнянні їх з модельними та розрахунковими. За результатами експериментів отримані поточні та інтегральні значення коефіцієнта ежекції, теплового коефіцієнта з урахуванням витрат на термонасос, вплив відхилень робочих параметрів на ці показники, а також вплив величин швидкісних коефіцієнтів на коефіцієнт ежекції.

Наступна серія експериментів проводилась на тому ж ежекторі, але зі зміною температури конденсації та компенсацією її зміною температури генерації. В випадках, коли температура конденсації підвищувалась відносно розрахункової, температура генерації також підвищувалась до значення, коли наставав новий граничний режим, тобто підвищувалась масова витрата робочої пари, але також підвищувалась її швидкість та щільність, тому для ежектованої пари залишався майже такий переріз, як і в розрахунковому режимі. При визначенні похибок прямих та непрямих вимірів використовувались міжнародні стандарти ISO 5725, в яких регламентовано процедури та методики розрахунку похибок.

В четвертому розділі наведено аналіз відомих та нових напрямків, які сприятимуть комерціалізації ЕХМ та розширенню сфери їх застосування. Для цього потрібно вирішити принаймні 3 основні задачі: підвищити рівень величини теплового коефіцієнта ЕХМ для кондиціонерів до рівня сорбційних систем, розширити діапазон температур отриманого холоду та створити комбіновані енергетичні системи, в яких виробляється декілька енергетичних потоків

Встановлено, що для вирішення першої проблеми перспективним залишилось використання бінарних сумішей холодоагентів. В цьому напрямку встановлені додаткові закономірності підвищення ефективності та критерії вибору компонентів, які дають можливість підвищити коефіцієнт ежекції та тепловий коефіцієнт БЕХМ. До цих критеріїв належить також і  $Z_p/Z_0$  (рис. 8) тощо.

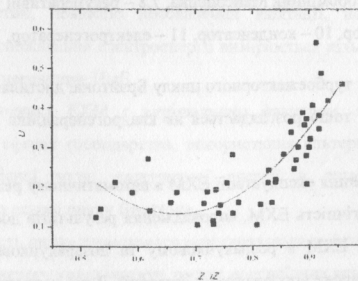


Рис. 8. Залежність коефіцієнту ежекції від співвідношення коефіцієнтів стиснення компонентів суміші.

Порівняння показує, що для БЕХМ тепловий коефіцієнт перевершує такий для чистих речовин в 1,5 – 2 рази.

Для вирішення другої проблеми наведені також нові цикли та схеми, які дозволяють отримувати в ЕХМ низькі температури, які поєднують ступеневі та каскадні принципи, а також використання бінарних та мультикомпонентних ЕХМ. За допомогою поєднання мультикомпонентних автокаскадів можливо досягнення криогенних температур за рахунок низькопотенційного тепла.

Третій напрямок подальших досліджень полягає в підвищенні використання ексергії вторинного або сонячного тепла шляхом одночасного виробництва електроенергії, холоду та прісної або очищеної води. Ежектор наразі може виступати в ролі пароповітряного компресора в циклі Брайтона (рис. 9), що значно збільшує корисну роботу цього циклу, оскільки не витрачається частина роботи турбіни на привід компресора. Водночас, надлишок тепла служить для виробництва холоду, очищення води, а також для цілей опалення та гарячого водопостачання.

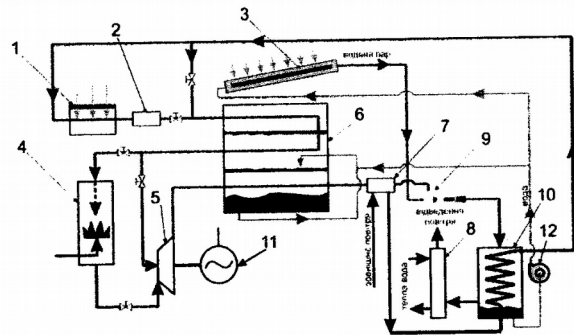


Рис. 9. Схема турбо-ежекторної енергогенеруючої системи з використанням циклу Майсоценка: 1 – сонячний колектор, 2 – теплообмінник, 3 – високотемпературний сонячний колектор, 4 – паливник, 5 – турбіна, 6 – тепломасообмінник Майсоценка, 7, 8 – рекуперативні теплообмінники, 9 – пароповітряний ежектор, 10 – конденсатор, 11 – електрогенератор, 12 – водяний насос.

Робота сумішених циклів: турбоежекторного циклу Брайтона, дистилаційного вузла, ЕХМ, тепло насосної ежекторної системи тощо розглядається як квадрогенераційна система, яка має найвищі інтегральні показники.

В п'ятому розділі «Концепція експлуатації ЕХМ в автоматичному режимі, техніко-економічний аналіз їх ефективності. Екологічність ЕХМ, впровадження результатів дослідження» розглядаються нові принципи автоматизації ЕХМ в розрахунковому та позарахункових режимах, які надають можливість вести мову про широке впровадження інновації. В цій концепції детально розроблені всі дії на кожному етапі роботи системи – від увімкнення до заходів по захисту при аварійних ситуаціях. Особлива увага приділяється регулюванню робочих параметрів при роботі в позарахункових

режимах та переходах на сезонні ежектори, що є головним в усталенні енергетичних параметрів циклу ЕХМ. Розроблений контролер чітко забезпечує реагування на зміну параметрів шляхом аналізу ситуації та вжиттям необхідних заходів щодо забезпечення заданого режиму.

Комерціалізація ЕХМ передбачає ретельний аналіз ринку аналогічної продукції, створення передумов для поширення попиту на ЕХМ. Для цього прийнята стратегія знаходження компромісу інтересів виробника (інвестора) та споживача. В роботі окреслені кола потенційних споживачів, первісний обсяг ринку та його розвиток при приєднанні нових груп споживачів. Техніко-економічний аналіз ЕХМ щільно пов'язаний з ексергетичним та екологічним аналізом, що є потужним стимулом запобіганню помилок при виробництві та реалізації ЕХМ. Виконані розрахунки термінів окупності ЕХМ для виробника при різних рівнях рентабельності, а також терміни окупності для споживача, за якими можливо регулювати попит на ЕХМ. При низьких цінах на електрику АБХС мають невелику перевагу перед ЕХМ, але при підвищенні цін на електрику вище 10 євроцентів за 1 кВт.год., ЕХМ стають більш економічними. Екологічний аналіз виконується за визначенням так званого екологічного фактору або екологічного ККД. При визначенні цього фактору враховуються шкідливі викиди, які супроводжують виготовлення обладнання та викиди, які виникають в процесі експлуатації холодильних систем.

$$\psi = \frac{\sum M}{W} \quad (8)$$

де  $\sum M$  – сумарні викиди, т.,  $W$  – сумарне виробництво певного виду енергії за поточний рік, кВт.год.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на створення та дослідження автономної ЕХМ з термонасосом гравітаційного типу, визначення її енергетичних та експлуатаційних показників. За отриманими результатами зроблено наступні висновки:

1. Ефективність створеного термонасоса гравітаційного типу має високі значення (до 97%), він не містить рухомих частин, повністю позбавлений кавітації, його надійність визначається соленоїдними вентилями, споживання електроенергії вимірюється кількома Ватами лише на роботу вентилів, звукова емісія не перевищує 10дБ.

2. Автономізація неводних ЕХМ є вирішальним фактором, який відкриває шлях до їх впровадження в багатьох сферах господарства, використання альтернативних джерел енергії для виробництва холоду, прісної води, електричної енергії в органічних циклах Ренкіна та турбоежекторних циклах на основі циклу Брайтона.

3. Оптимальна тривалість циклу термонасоса розраховується за інтегральними показниками всієї системи (COP, маса заправленого холодоагенту, ресурс соленоїдних вентилів).

4. Комбінована сонячна система кондиціонування на базі циклу Майсоценка та автономної ЕХМ, яка працює ефективно та економічно при будь-якій вологості зовнішнього повітря, тобто може використовуватися навіть в спекотних регіонах з вологістю повітря, наближеною до 100%.

5. Втрати енергії на удар в ежекторі має оптимальну величину, яка визначається максимальним коефіцієнтом ежекції при незмінних параметрах циклу.

6. Співвідношення коефіцієнтів стиснення робочої пари з парогенератора і пари з випарника є новим критерієм підвищення коефіцієнта ежекції при його наближенні до 1.

7. Величини швидкісних коефіцієнтів ділянок проточної частини ежектора залежать від роду речовини, зокрема для R-142b, R-600a, R-152a, R-245fa вони вищі на 4-15% від швидкісних коефіцієнтів пароводяних ежекторів, які до сьогодні використовуються в розрахунках інших авторів.

8. ЕХМ в різних модифікаціях можуть бути використані для отримання холоду в усьому діапазоні температур за рахунок низького потенційного тепла, при цьому їх енергетичні показники не поступаються традиційним генераторам холоду.

9. Розраховані за рівнянням стану термодинамічні властивості ефіру HFE-7500, дозволяють успішно використовувати його як робочу речовину бінарної гетероазетропної суміші з водою при температурах генерації, вищих за 390-420K.

10. Використання комбінованих термодинамічних циклів ЕХМ з компресорно-детандерними циклами для скраплення природного газу в стаціонарних умовах та на судах-газовозах, робить транспортування СПГ на 25% більш рентабельним в порівнянні з роботою газогонів.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Транспортная энергетическая система с эжекторных автомобильным кондиционером [Текст] / Д. И. Буйаджи, А. Д. Буйаджи, А. В. Шампин, С. В. Ниченко // Холодильная техника и технология. - 2011. - №4 (132). - С.56-61.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування загальної концепції та алгоритм розрахунків.*

2. Conceptual design of binary/multicomponent fluid ejector refrigeration systems [Text] / D. Buyadgie, O. Buyadgie, S. Artemenko, A. Chamchine, O. Drakhnia. // International Journal of Low-Carbon Technologies/ Oxford Journals, 2012 - vol. 7 (2), June 2012 - P. 120-127.

*Особистий внесок здобувача: розробка схемних рішень та методики розрахунків.*

3. Solar cooling technologies using ejector refrigeration system [Text] / Buyadgie D., Buyadgie O., Drakhnia O., Artemenko S., Chamchine A. // Energy Procedia. - 2012.-Vol.30.- pp. 912 - 920.

*Особистий внесок здобувача: розробка комбінованих схем, опис термодинамічних процесів.*

4. Theoretical Study Of The Combined M-Cycle/Ejector Air-Conditioning System [Text]/ Buyadgie D., Buyadgie O., Drakhnia O., Sladkovsky E., Artemenko S., Chamchine A. // International Journal Of Energy For A Clean Environment / Begell House, 2011 - vol. 12, Issue 2-4 - P. 309-318.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування переваг ежекторної холодильної системи, комбінованої з циклом Майсоценка.*

5. Многофункциональные эжекторные холодильные системы (ЭХС) [Текст]/ Буйаджи Д. И., Буйаджи А. Д., Дражня А. Ю., Шампин А. В. // 36. науч. пр. VIII міжнар. наук.-техн. конф. "Сталій розвиток і штучний холод" (додаток до наук.-техн. ж-лу "Холодильна техніка та технологія", вип. 4 (138). - Одеса: ОДАХ. - 2012. - С.156-162.

*Особистий внесок здобувача: розробка комбінованих схем та циклів, CFD-модель ежектора.*

6. Solar low-pressure turbo-ejector Maisotsenko cycle-based power system for electricity, heating, cooling and distillation [Text]/ D. Buyadgie, O. Buyadgie, O. Drakhnia, P. Brodetsky, V. Maisotsenko// International Journal of Low-Carbon Technologies / Oxford Journals, 2015 - vol. 10, - P.157-164

*Особистий внесок здобувача: ідея використання ежектора в пароповітряному циклі Брайтона одночасно в якості компресора та зволожувача повітря, CFD-модель пароповітряного ежектора.*

#### Опубліковані роботи апробаційного характеру

7. Conceptual approaches to innovative energy saving technologies and reducing greenhouse effect/ Buyadgie D., Buyadgie O., Vasil'ev I., Nichenko S., Sechenyh V. // 21<sup>st</sup> World Energy Congress, 11 - 16 September, 2010, - Montreal, Canada.

8. Hydrogen Generation and Application for Power, Heat and Cold Production / Buyadgie D., Nichenko S., Buyadgie O. // World Renewable Energy Congress XI, 25 - 30 September, 2010, - Abu Dhabi, UAE.

9. Transport Energy Supply System with Heat Utilizing Ejector Automobile Air Conditioner / Buyadgie D., Buyadgie O., Vasil'ev I., Nichenko S., Sechenyh V. // The 5<sup>th</sup> Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, ACRA 2010, 7 - 9 June, 2010, - Tokyo, Japan.

10. Conceptual Design of Two-Stage Air-Conditioner / Buyadgie D., Buyadgie O., Vasil'ev I., Nichenko S., Sechenyh V. // The 5<sup>th</sup> Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, ACRA 2010, 7 - 9 June, 2010, - Tokyo, Japan.

11. Novel ejector cooling technologies using binary fluids / Buyadgie D., Nichenko S., Buyadgie O. // 9<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, 24 - 27 August, 2010, - Shanghai, China.

12. Combined Heat, Cold And Fresh Water Supply Using Binary Fluid Ejector Refrigerating System. / Buyadgie D., Buyadgie O., Drakhnia O., Chamchine A., Artemenko S. // The 23<sup>rd</sup> IIR International Congress of Refrigeration, 21 - 26 August, 2011, - Prague, Czech Republic.

13. Binary and multicomponent fluids for ejector refrigerating system / D. Buyadgie, O. Buyadgie, S. Artemenko, A. Chamchine, O. Drakhnia. // 10<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET2011, 4 - 7 September, 2011, - Istanbul, Turkey.

14. Solar Cooling Technologies Using Ejector Refrigeration System (ERS) / D. Buyadgie, O. Buyadgie, O. Drakhnia, S. Artemenko, A. Chamchine. // International Conference of Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry SHC, 9 - 11 July, 2012, - San Francisco, USA.

15. Autonomous Solar Energy Supply System With Different Type Of Thermotransformers / **Buyadgie O.**, Buyadgie D., Drakhnia O., Chamchine A., Artemenko S. // 11<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET 2012, 2 – 5 September, 2012, – Vancouver, Canada.
16. Waste heat-driven refrigeration and cryogenic systems for LNG vessels / Buyadgie D., **Buyadgie O.**, Drakhnia O. Sladkovskiy Y., Chamchine A.// The 5<sup>th</sup> international conference on cryogenics and refrigeration, 6 – 9 April, 2013, – Hangzhou, China.
17. Prototype ejector refrigeration system with thermopump testing in an air-conditioning mode/ Buyadgie D., **Buyadgie O.**, Drakhnia O. Sladkovskiy Y., Chamchine A. // The 5<sup>th</sup> international conference on cryogenics and refrigeration, 6 – 9 April, 2013, – Hangzhou, China.
18. Analysis of refrigerants properties for the ejector refrigeration systems / Artemenko S., Buyadgie D., **Buyadgie O.**, Drakhnia O., Sladkovsky E., Chamchine A. // 4<sup>th</sup> Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, 17-19 June, 2013, – Delft, The Netherlands.
19. Exergy analysis of the jet thermotransformers/ Buyadgie D., **Buyadgie O.**, Drakhnia O., Sladkovskiy E., Artemenko S., Chamchine A. // 3<sup>rd</sup> International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS3), 07-09 July, 2013, – Nisyros, Greece.
20. Combined Solar Ejector Heating and Air-Conditioning System / **O. Buyadgie** // International Conference of Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry SHC, 23 – 25 September, 2013, – Freiburg, Germany.
21. Solar Low-Pressure Turbo-Ejector M-Power System for Electricity, Heating and Cooling / D. Buyadgie, **O. Buyadgie**, O. Drakhnia, P. Brodetsky, V. Maisotsenko// 13<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET2014, 25 – 28 August, 2014, – Geneva, Switzerland.
22. Sustainable working fluids for ejector technology systems / S. Artemenko, **O. Buyadgie** // 1<sup>st</sup> International Summer Conference on Fluid and Thermal Engineering, ASFTE, 09 – 12 August, 2015, – New York, USA.
23. Thermally driven hybrid ejector heating and cooling technologies: an innovative solution beyond comparison / **O. Buyadgie**, D. Buyadgie, O. Drakhnia //The 24<sup>th</sup> IIR International Congress of Refrigeration, 16 – 22 August, 2015, – Yokohama, Japan.
24. A Comparative Analysis of the Maisotsenko Cycle Based Air-conditioning Systems: Ejector Cooling vs. Solid Desiccant / **O. Buyadgie**, D. Buyadgie, O. Drakhnia, V. Maisotsenko, T. Miyazaki // 14<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, SET2015, 25 – 28 August, 2014, – Nottingham, UK.

#### Патенти:

25. Пат. UA 108150 МПК F03G 6/00 F25B 27/00 F24J 2/32. Спосіб одночасного виробництва електроенергії та холоду і система для його здійснення [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д., Сладковський С. М. - № а 2013 10918, заявл. 11.09.2013, опубл. 25.03.2015, Бюл. №4.
26. Пат. WO 2014/011137 A1 F25B 41/00 F17C 5/00 F04F 1/00. Спосіб подачі жидкості и установка для его осуществления (Варианты) / Method for feeding liquid and apparatus for implementing same

- (Variants) [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № РСТ/UA2013/000071, заявл. 09.07.2013, опубл. 16.01.2014.
27. Пат. UA 102488 МПК F16H 39/00 F25B 41/00. Спосіб подачі рідини із порожнини низького тиску в порожнину високого тиску та установка для його здійснення [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № а 2012 08538, заявл. 10.07.2012, опубл. 10.07.2013, Бюл. №13.
28. Пат. UA 100304 МПК F24D 11/02 F24H 4/00 F24J 2/00. Система тепло- і холодопостачання висотних споруд (Варианти) [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № а 2011 04762, заявл. 18.04.2011, опубл. 10.12.2012, Бюл. №23.
29. Пат. UA 98716 МПК F24D 11/02 F24H 4/00 F24J 2/00. Спосіб комбінованого отримання холоду і тепла з використанням сонячної енергії та установка для його здійснення. [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № а 2011 00546, заявл. 18.01.2011, опубл. 11.06.2012, Бюл. №8.
30. Пат. кор. модель UA 89808 МПК C02F 1/10. Система для кондиювання вологого повітря. [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № у2013 15301, заявл. 26.12.2013, опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.
31. Пат. UA 106328 МПК F02C 6/18 F01K 23/00. Спосіб виробництва механічної та електричної енергії та система для його здійснення [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д., Сладковський С. М. - № а 2013 11233, заявл. 20.09.2013, опубл. 11.08.2014, Бюл. №15.
32. Пат. UA 103365 МПК F25B 1/02 F25B 1/06. Установка для отримання тепла або холоду (Варианти) [Текст] / Буйджі Д.І., Буйджі О. Д. - № а 2011 10382, заявл. 26.08.2011, опубл. 10.10.2013, Бюл. №19.

#### АНОТАЦІЯ

**Буйджі О.Д.** “Підвищення ефективності процесів термотрансформації в автономних ежекторних холодильних машинах”. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна і компресорна техніка, системи кондиювання». – Одеська національна академія харчових технологій. МОН України, Одеса, 2016.

Дисертація спрямована на подальше удосконалення ежекторних холодильних машин з метою підвищення енергетичних та експлуатаційних показників, зокрема, завдяки їх автономізації.

В дисертаційній роботі наведено всебічний аналіз різних ЕХМ, які можуть працювати в широкому діапазоні температур, що змінило погляд на можливості цих систем. Розроблено універсальний алгоритм та програму розрахунків коефіцієнту ежекції, виконано CFD-модель ежектора та визначено значення швидкісних коефіцієнтів в проточній частині ежектора для різних холодоагентів, що дозволило наблизити результати розрахунків ежектора до модельних та експериментальних величин.

Розроблені та експериментально досліджені нові конструкції термонасосів, які показали високу економічність та надійність. Виконано експериментальне дослідження ЕХМ з термонасосом

гравітаційного типу, визначені основні характеристики системи та її складових. Дисертаційна робота отримала практичне впровадження при проектуванні та виготовленні промислових взірців ЕХМ, створенні ТУ та міжнародного сертифіката прототипу системи. Визначені показники рентабельності для виробників та споживачів, а також екологічні характеристики системи.

Ключові слова: ежектор, термотрансформатор, ежекторна холодильна машина, термонасос, CFD-модель, рентабельність, екологічні показники.

#### АННОТАЦИЯ

**Буяджи А.Д. «Повышение эффективности процессов термотрансформации в автономных эжекторных холодильных машинах».** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская национальная академия пищевых технологий. МОН Украины, Одесса, 2016.

Диссертация направлена на дальнейшее совершенствование эжекторных холодильных машин с целью повышения энергетических и эксплуатационных показателей, в частности, благодаря их автономизации.

В диссертационной работе приведен всесторонний анализ различных ЭХМ, которые могут работать в широком диапазоне температур, что изменило взгляды на возможности этих систем. Разработаны универсальный алгоритм и программа расчетов коэффициента эжекции, выполнена CFD-модель эжектора и определены значения скоростных коэффициентов в проточной части эжектора для различных хладагентов, что позволило приблизить результаты расчета эжектора к модельным и экспериментальным величинам.

Разработаны и экспериментально исследованы новые конструкции термонасосов, которые показали высокую экономичность и надежность.

Выполнено экспериментальное исследование ЭХМ с термонасосом гравитационного типа, определены основные характеристики системы и ее составляющих.

Диссертационная работа получила практическое внедрение при проектировании и изготовлении промышленных образцов, создании ТУ и международного сертификата прототипа системы. Определены показатели рентабельности для производителей и потребителей, а также экологические характеристики системы.

Ключевые слова: Эжектор, термотрансформатор, эжекторная холодильная машина, термонасос, CFD-модель, рентабельность, экологические показатели.

#### ABSTRACT

**Buyadgie O.D. «The Thermotransformation Processes Efficiency Enhancement in The Self-Contained Ejector Refrigerating Machines».** Manuscript copyright.

PhD. Thesis 05.05.14 – «Refrigerating, vacuum and compression machines and air-conditioning systems» – Ministry of Education of Ukraine, The Odessa National Academy of Food Technologies, V.S. Martynovsky Institute of Refrigeration, Cryogenic Technologies and Eco-Energetics, Odessa, 2016.

The thesis devoted to further improvement of the ejector refrigerating machines with a purpose to increase its efficiency and performance rating, specifically, at the expense of the self-regulating effect.

The thesis contains the in-depth analysis of the various ejector refrigerating machines that turned round the applicability of these systems. It was developed a universal algorithm and engineering methodology for entrainment ratio calculation, performed the computer simulation of the ejector model with a subsequent identification of the velocity coefficients in the flow part of the ejector for various low-boiling refrigerants. As a result, the theoretical approach for the ejector calculation was approximated with CFD models and experimental data. The thermopump as a liquid refrigerant feeding device was developed and experimentally validated that proved high efficiency and economic feasibility of the “true heat driven” ejector refrigerating cycle along with high reliability and durability of the overall system.

The test bench of the ejector refrigerating machine with thermopump was experimentally investigated; the main system's characteristics and components were identified.

The practical outcome of the work was realized in the integration of the ejector refrigerating machines into commercial prototype designs and assembling, engineering specification development and National Standards. The cost-benefit analysis for potential manufacturers and consumers was carried out in the economical part of the thesis along with environmental benefits from its application.

Keywords: Ejector, thermally activated unit, ejector refrigerating machine, thermopump, CFD modelling, cost-benefit, environmentally friendly.

Підписано до друку 27.01.2016 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Гарнітура Times. Друк різнографічний.  
Зам. № 4. Тираж 100 прим.

Надруковано ТОВ «Зовнішрекламсервіс»  
65011, м.Одеса, вул. Успенська, 40.  
тел. 37-70-76, 777-70-76