

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ШАРАПОВ СЕРГІЙ ОЛЕГОВИЧ



УДК 621.694.2:[519.876.5](043.3)

**УДОСКОНАЛЕННЯ ВАКУУМНИХ АГРЕГАТІВ
НА БАЗІ РІДИННО-ПАРОВИХ ЕЖЕКТОРІВ**

05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціювання

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Сумському державному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, професор
АРСЕНЬЄВ Вячеслав Михайлович,
Сумський державний університет,
професор кафедри технічної теплофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
МОРОЗЮК Лариса Іванівна,
Навчально-науковий інститут холоду,
кріотехнологій та екоенергетики
ім. В. С. Мартиновського Одеської
національної академії харчових технологій,
професор кафедри кріогенної техніки

кандидат технічних наук, доцент
КОНОВАЛОВ Дмитро Вікторович,
Херсонська Філія Національного
університету кораблебудування
ім. адм. Макарова, доцент кафедри
теплотехніки

Захист відбудеться «25» січня 2018 року о 13 годині 00 хвилин в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: 65082, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій (65082, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна).

Автореферат розіслано «18» грудня 2017 року.

**Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.03**
доктор технічних наук, професор



В. І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У наш час у різних галузях промисловості й техніки все більш широкого використання набувають технологічні процеси із застосуванням вакууму. Так, у металургії це дугове та індукційне вакуумне плавлення, позапічне вакуумне оброблення та розливання рідкої сталі, вакуумне термічне оброблення, рафінування металів і сплавів у твердому стані, в харчовій промисловості – дезодорація рослинних олій, згущення молока методом випарювання до певного вмісту сухих речовин та ін.

Застосування вакууму дає можливість значно покращити якість отриманих кінцевих продуктів за рахунок зменшення у них вмісту шкідливих домішок унаслідок запобігання взаємодії технологічних систем із повітрям і збільшення ступеня повноти протікання процесів, а також відкриває широкі перспективи розроблення нових, більш досконалих технологічних процесів та отримання кінцевих продуктів, які неможливо здійснити в умовах атмосферного тиску.

Здебільшого вакуум одержують за рахунок енергії робочого струменя потоку. До таких апаратів належать агрегати, до складу яких входять пароструминні ежектори, що при відношенні тисків $\sim 10-20$ є, як правило, багатоступеневими, а їх загальний ККД знаходиться на рівні 2–10 %. Такий низький рівень їх ефективності пов'язаний із тим, що підвищити тиск в одному пароструминному ступені можна лише у 2–3 рази за умови високого рівня перетворення енергії. Більший ступінь підвищення тиску в одному ступені призводить до різкого зниження ККД ежектора, що пов'язано з втратами «на удар» і змішуванні надкритичного активного та докритичного пасивного потоків.

У цій ситуації досить актуальним постає питання застосування рідинно-парового ежектора (РПЕ), що працює за принципом струминної термокомпресії (СТК). Цей принцип базується на тому, що проходження робочої речовини активного потоку через сопло Лавалю супроводжується процесом релаксаційного пароутворення в тій його частині, яка розширюється. Кінетика цих процесів характеризується наявністю трьох характерних перерізів, в яких відбувається структурна перебудова потоку. У вихідному перерізі сопла активного потоку РПЕ формується надзвуковий струмінь дрібнодисперсної парокраплинної структури з високим об'ємним вмістом пари, тиск якої менший, ніж тиск навколишнього середовища. Ця пара інжектуює робочу речовину пасивного потоку, що надходить до приймальної камери з відкачуваного об'єму. На вході до камери змішування тиски робочих речовин активного та пасивного потоків вирівнюються і відбувається їх змішування в єдиний двофазний потік, після цього в дифузорі відбувається подальше стиснення змішаного потоку. Стиснена в РПЕ пара відділяється в сепараторі інерційного типу, з якого насичена рідина відводиться насосом у циркуляційний контур і після підігрівання в теплообміннику-підігрівачі знову подається у сопло активного потоку.

Аналіз сучасного стану питання засвідчив, що РПЕ, робочий процес якого

ґрунтується на принципі СТК, дає можливість одержати високі показники енергетичної ефективності. Доцільність його реалізації пов'язана з досить високою ефективністю, зумовленою незначними втратами «на удар», малими витратами енергії на подачу рідини, що мало стискається, і можливістю утилізації (або регенерації) низькопотенціального тепла замість витрат механічної енергії на привод.

На базі РПЕ вакуумного агрегата, що працює за принципом СТК, можливо реалізувати принципово новий цикл перетворення енергії, до пріоритетів якого необхідно віднести:

- можливість створення вакуумної установки з досить високим ККД;
- зниження або повне виключення споживання котельної пари порівняно з роботою класичного пароструминного ежектора за рахунок підігрівання насиченою рідини в теплообміннику-підігрівачі;
- використання широкого спектра теплоносіїв.

Для проектування вакуумних установок на базі РПЕ необхідна методика їх розрахунку, яка достатньою мірою відображає характер процесів, що проходять у проточній частині. Таким чином, детальне теоретичне й експериментальне дослідження робочого процесу РПЕ та створення теплофізичних методик його розрахунку на сьогодні є актуальним і має практичне значення.

Недостатня вивченість процесів течії закипаючої рідини в каналах, що розширюються, з подальшим розширенням цієї рідини до тисків, нижчих за атмосферний, і робочого процесу РПЕ, що ґрунтується на принципі СТК, зумовили вибір теми дисертаційного дослідження – «Удосконалення вакуумних агрегатів на базі рідинно-парових ежекторів».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету. Наукові розробки реалізовані при виконанні держбюджетних тем № 81.02.03.08-09 «Розробка бінарної паротурбінної установки (міні-ТЕЦ) для ресурсозберігаючого електро- і теплопостачання підприємств України» (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0108U000672), № 81.01.04.10-11 «Розробка струминного понижуючого термотрансформатора для систем ефективного теплопостачання комунальних господарств України» (замовник – Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, номер державної реєстрації 0110U001150) та № 51.15.01-01.12/13.зп «Створення демонстраційного зразка струминного термотрансформатора для систем тепло- і холодопостачання комунальних і промислових господарств України» (замовник – Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, номер державної реєстрації 0112U001386). Тема дисертаційного дослідження затверджена вченою радою Сумського державного університету (протокол № 4 від 04.12.2008 р.). Тема скорегована на засіданні вченої ради Сумського державного університету 20.04.2017 року, протокол № 10.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є

вдосконалення математичної моделі та методики розрахунку рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата, з одержанням витратних та енергетичних характеристик і визначенням шляхів підвищення ефективності вакуумних систем.

Для реалізації поставленої мети сформульовані й потребують вирішення такі завдання:

- розроблення математичної моделі робочого процесу і методики розрахунку рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата в різному конструктивному виконанні;

- експериментальна перевірка результатів числового моделювання робочого процесу рідинно-парового ежектора і визначення кореляційних коефіцієнтів;

- оцінювання впливу конструктивних і режимних параметрів на рівень вакууму, що досягається в рідинно-паровому ежекторі;

- уточнення математичної моделі на основі виконаних експериментальних досліджень;

- виконання ексергетичного аналізу вакуумних агрегатів на базі рідинно-парових ежекторів;

- оптимізація параметрів вакуумних пристроїв за результатами ексергетичного аналізу вакуумних агрегатів на базі рідинно-парових ежекторів.

Об'єкт дослідження – робочий процес рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата.

Предмет дослідження – параметри і характеристики рідинно-парового ежектора, вакуумних агрегатів та систем на його основі.

Методи дослідження. Під час вирішення поставлених завдань використовували такі методи дослідження, як аналіз науково-технічної інформації, теплофізичне та математичне моделювання, фізичний експеримент.

У результаті аналізу науково-технічної інформації були сформульовані мета і завдання дослідження.

У результаті теплофізичного моделювання уточнена модель робочого процесу рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата. Математична модель розрахунку робочого процесу рідинно-парового ежектора реалізована алгоритмічною мовою Pascal у середовищі Turbo Pascal.

Фізичний експеримент передбачав випробування окремо активного сопла з метою виявлення закономірностей процесу витікання закипаючої рідини, в області тисків нижчих за атмосферний і випробувань рідинно-парового ежектора для визначення показників ефективності його робочого процесу.

Достовірність одержаних експериментальних результатів забезпечується використанням загальноприйнятої в практиці компресоробудування методики проведення випробувань, а також допустимою похибкою вимірювання фізичних параметрів.

Достовірність одержаних в роботі теоретичних результатів оцінювалася їх порівнянням з експериментальними даними.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше:

- виявлено взаємозв'язок режимних параметрів робочої рідини на вході до

сопла активного потоку і показників ефективності рідинно-парового ежектора в цілому, що дозволяє визначити діапазон роботи вакуумних установок із максимальною ефективністю;

– уточнено математичну модель робочого процесу рідинно-парового ежектора, що дозволяє більш достовірно відобразити характер процесу за значень тиску, нижчих від атмосферного;

– встановлено характер впливу термодинамічних властивостей різних робочих середовищ пасивного потоку (водяна пара, повітря, пароповітряна суміш) на ефективність рідинно-парового ежектора;

– отримані кореляційні коефіцієнти, що дозволяють створити вакуумний агрегат на базі рідинно-парового ежектора, який за заданих параметрів буде працювати з максимальною ефективністю.

Практичне значення одержаних результатів:

– створено алгоритм розрахунку параметрів робочого процесу рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата та його програмну реалізацію, що враховують характер перебігу процесу за значень тисків, нижчих від атмосферного і дозволяють на стадії проектування визначити його геометричні параметри та основні характеристики;

– створено методику інженерного розрахунку параметрів і характеристик рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата, що дозволяє виконати поелементний розрахунок ежекторів різних конструктивних виконань;

– створено експериментальний стенд, який дозволяє на прозорій моделі дослідити перебіг процесу витікання закипаючої рідини у каналах, що розширюються, і процес подальшого її змішування з пасивним потоком, що знаходиться за тиску нижчого від атмосферного, в камерах змішування різної геометричної форми;

– розроблені конструктивні схеми вдосконалення існуючих і створення нових вакуумних систем шляхом заміни неефективного обладнання на вакуумні агрегати на базі рідинно-парових ежекторів;

– результати дисертаційної роботи впроваджені у ПАТ «Сумське НВО», використовуються в навчальному процесі на факультеті технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ і підтверджені відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що були одержані у процесі виконання дисертаційної роботи і подані в дисертації, а саме: створення математичної моделі робочого процесу рідинно-парового ежектора вакуумного агрегата, створення експериментального стенда дослідження рідинно-парового ежектора під час його роботи в режимі вакуумування, оцінювання енергетичної ефективності залежно від впливу на неї різних факторів та доцільності застосування установок на базі рідинно-парового ежектора, належать авторові та опубліковані у статтях особисто або зі співавторами.

Постановлення завдань, вибір методів дослідження, аналіз та узагальнення результатів виконані разом із науковим керівником, який координував основні етапи роботи над дисертацією.

Апробація результатів дисертації здійснювалася на науково-технічних конференціях різних рівнів:

– III Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження ENERGIA-2009» (м. Алушта, 2009 р.);

– VI, VII, IX, X та XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 рр.);

– III Міжнародній науково-технічній конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (м. Миколаїв, 2009 р.);

– XV та XVIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2010, 2013 рр.);

– Міжнародній конференції «Створення і використання сучасного енергоефективного компресорного устаткування в гірничорудній і інших галузях промисловості» (м. Суми, 2010 р.);

– XVI Міжнародній конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії» (м. Дніпропетровськ, 2011 р.);

– VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток та штучний холод» (м. Одеса, 2012 р.);

– VIII International Conference on Compressors and Coolants «Compressors 2013» (Papiernicka – Smolenice – Slovak Republik, 2013 р.);

– II Міжнародній науково-практичній конференції «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях» (м. Суми, 2017 р.);

– XV Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання» – «ГЕРВІКОН + НАСОСИ-2017» (м. Суми, 2017 р.);

– I і II Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2010, 2012 рр.);

– науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем і енергоефективних технологій СумДУ (м. Суми, 2009 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 23 наукові праці, зокрема: 11 статей у наукових журналах (8 – у спеціалізованих виданнях, затверджених положенням МОН України, 2 – у закордонних виданнях та 1 – у журналі, що індексується базою даних Scopus), 11 тез доповідей та 1 патент на корисну модель. Матеріали дисертаційної роботи використовувалися також у звітах із науково-дослідної роботи кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 173 сторінки. Дисертаційна робота містить 64 рисунки, 10 таблиць, бібліографію із 136 джерел на 15 сторінках, 3 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і доцільність дослідження РПЕ вакуумного агрегату, необхідність вдосконалення математичної моделі і методики розрахунку його робочого процесу; визначено об'єкт, предмет, мету, завдання та методи; розкрито наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, подано відомості про апробацію та впровадження результатів наукового пошуку.

У першому розділі «**Інформаційно-аналітичний огляд літературних джерел і постановлення завдань дослідження**» виділено особливості робочого процесу РПЕ, який базується на принципі СТК, при використанні його у складі вакуумного агрегату, визначено основні переваги застосування РПЕ у системах вакуумування і подано огляд існуючих моделей розрахунку його робочого процесу.

Робочий процес РПЕ вакуумного агрегату, який працює за принципом СТК, має певні особливості (рис. 1). Це, перш за все, пов'язано із переміщенням процесу змішування робочих середовищ активного і пасивного потоків в область тисків нижчих за атмосферний, де суттєвішою стає різниця між термодинамічними параметрами. Також помітно змінюються значення вмісту пари у змішаному потоці на виході з РПЕ, що, у свою чергу, викликає зміну кінцевих досяжних показників ефективності, таких як перевиробництво пари і коефіцієнт інжекції.

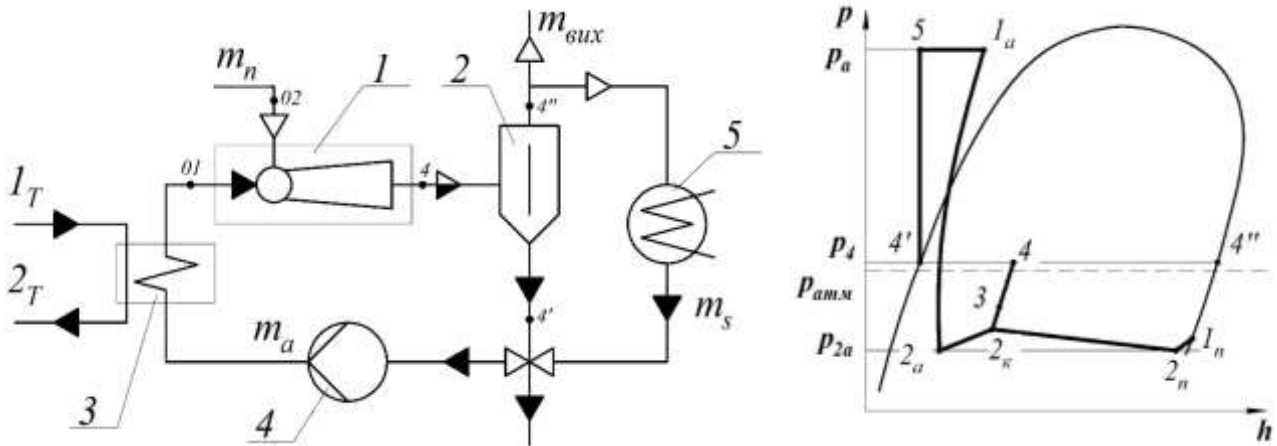


Рисунок 1 – Схема і цикл у p, h -координатах вакуумного агрегату на базі РПЕ:
1 – РПЕ, 2 – сепаратор, 3 – теплообмінник, 4 – циркуляційний насос,
5 – конденсатор

Порівняно з пароструминними ежекторами, РПЕ має досить високу ефективність, яка досягається за рахунок принципово нового способу розширення робочого струменя у соплі активного потоку. Також змішування двох докритичних потоків у камері змішування дозволяє практично звести до нуля втрати «на удар» та значно підвищити ефективність РПЕ. Наведені фактори, які характеризують переваги застосування РПЕ порівняно із

пароструминними ежекторами, свідчать про перспективність їх застосування у вакуумних системах.

Аналіз існуючих моделей робочих процесів двофазних струминних апаратів показав, що перші методики розрахунку (К. Пфлейдерер, К. Г. Клене, Г. А. Аронс), дають лише загальне уявлення про процеси, які відбуваються у проточній частині апарату. При подальших дослідженнях виявлено, що отримані розрахункові дані мають значні відхилення від результатів, отриманих експериментально, тому Л. Д. Берман, М. М. Зінгер, М. І. Баженов та ін. запропонували користуватися виключно емпіричними залежностями для кожного конкретного режиму роботи.

Починаючи із досліджень Є. Я. Соколова, Г. І. Єфімочкина, Р. Г. Каннінгема, була підтверджена важливість впливу геометричних параметрів камери змішування на характеристики апарату. Спираючись на це, Р. Г. Каннінгем та Р. І. Допкін запропонували нову модель розрахунку, в якій використовується рівняння збереження кількості руху для камери змішування спільно з рівнянням нерозривності. В. П. Шидловський, Ю. М. Васильєв, М. Є. Дейч, Я. Р. Шапіро та В. Г. Цегельський продовжують досліджувати апарати з камерами змішування різної геометрії і дають визначення критичним режимам роботи ежектора. Їхня методика базується на сумісному розв'язанні системи рівнянь нерозривності, кількості руху, енергії і стану.

Найголовнішим недоліком усіх вищезазначених методик розрахунку є припущення про одномірність руху потоку, насправді ж процес змішування різнофазних струменів супроводжується обміном кількості руху, складними тепло- і масообмінними процесами, конденсацією, надзвуковими режимами руху двофазної суміші зі стрибками ущільнення та ін. В. М. Марченко та М. Г. Прокопов створили модель, яка базується на рівняннях стану термічного метастабільного парокрапельного середовища, збереження маси (з урахуванням фазового переходу), кількості руху, I-го і II-го законів термодинаміки. Вона дає змогу найбільш достовірно визначити параметри робочого процесу рідинно-парового струминного апарату, який працює у компресорному режимі без урахування особливостей вакуумного режиму роботи.

Саме тому метою дисертаційного дослідження є вдосконалення математичної моделі і методики розрахунку робочого процесу РПЕ вакуумного агрегату, її теоретичне та експериментальне підтвердження.

У результаті огляду літературних джерел та їх аналізу зроблені висновки про актуальність теми дослідження, визначені мета і поставлені завдання.

У другому розділі **«Теоретичне дослідження рідинно-парового ежектора, що працює у режимі вакуумування»** описано основні положення математичної моделі розрахунку робочого процесу РПЕ, оцінено вплив початкових параметрів на ефективність витікання закипаючої метастабільно перегрітої рідини активного потоку через канали, що розширюються, параметрів робочої речовини на вході у приймальну камеру і геометричних параметрів камери змішування на характер процесу змішування активного і пасивного потоків, проведено аналіз ефективності робочого процесу РПЕ в цілому.

Математична модель робочого процесу РПЕ базується на моделі, запропонованій Марченком В. М. та Прокоповим М. Г. з урахуванням особливостей розширення недогрітої до насичення закипаючої рідини, що витікає з каналів, що розширюються, в область тисків, нижчих за атмосферний. Дана модель чисельно описується у вигляді системи рівнянь збереження маси, кількості руху, енергії, стану середовища і виробництва ентропії у інтегральному вигляді, а також доповнюється залежностями з кінетики пароутворення і критичним режимам, характеристиками подрібнення та полідисперсного розподілу рідкої фази:

$$v = v_{pid}(t_{pid}) + x \cdot (v_n(p_n) - v_{pid}(t_{pid})), \quad (1)$$

$$d \left(\frac{w(z) \cdot F(z)}{v} \right) = 0, \quad (2)$$

$$dx = \chi(z) \cdot \left(\frac{v}{w(z)} \right) \cdot dz, \quad (3)$$

$$d \left(h_{pid}(t_{pid}) + \chi(h_n(p) - h_{pid}(t_{pid})) + \frac{w^2(z)}{2} \right) = 0, \quad (4)$$

$$d \left(\frac{w^2(z) \cdot F(z)}{v} \right) = -F(z) \cdot dp - \tau_w \cdot \Pi(z) \cdot dz, \quad (5)$$

$$d \left(s_{pid}(t_{pid}) + x(s_n(p) - s_{pid}(t_{pid})) \right) = \delta s_{diss} > 0, \quad (6)$$

де v - питомий об'єм частинки i -ї групи розподілу, $\text{м}^3/\text{кг}$, t - температура частинки i -ї групи розподілу, K , p - тиск частинки i -ї групи розподілу, Па , w - середня швидкість потоку частинок, $\text{м}/\text{с}$, F - площа перерізу, через яку проходять частинки i -ї групи розподілу, м^2 , z - безрозмірна повздовжня координата, χ - масовий вміст вологи, $\text{кг}/\text{кг}$, h - ентальпія частинки i -ї групи розподілу, $\text{Дж}/\text{кг}$, τ_w - дотична напруга на стінці, Па , Π - периметр каналу, через який проходять частинки i -ї групи розподілу, м , s - ентропія частинки i -ї групи розподілу, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, індекс «pid» - параметр у стані рідини, індекс «n» - параметр у стані пари.

Дотична напруга на стінці каналу визначає втрати на тертя у прилеглому шарі каналу

$$\tau_w = \left(\frac{\xi}{4} \right)^2 \cdot \frac{w^2(z)}{2v}, \quad (7)$$

де ξ - коефіцієнт місцевого опору.

У результаті числового моделювання робочого процесу РПЕ було виявлено, що досягнення досить високих показників ефективності можливе при переході на більш помірні значення початкових параметрів робочої рідини активного потоку на вході в ежектор. Основними такими показниками є ступінь

перевиробництва пари та коефіцієнт інжекції, залежність яких від початкового тиску P_0 показана на рис. 2.

Досягнення максимальної ефективності витікання і ступеня завершеності пароутворення у каналі визначаються положенням перерізу a , при якому відривання потоку відбувається на зрізі сопла. Тому при витіканні робочої рідини активного потоку з тиском нижчим за атмосферний, досить важливим є дотримання цієї умови. Для того, щоб забезпечити співпадання перерізу a і зрізу сопла, було виявлено залежність між параметрами робочої рідини активного сопла у вхідному і критичному перерізах та параметрами на виході з нього (рис. 3).

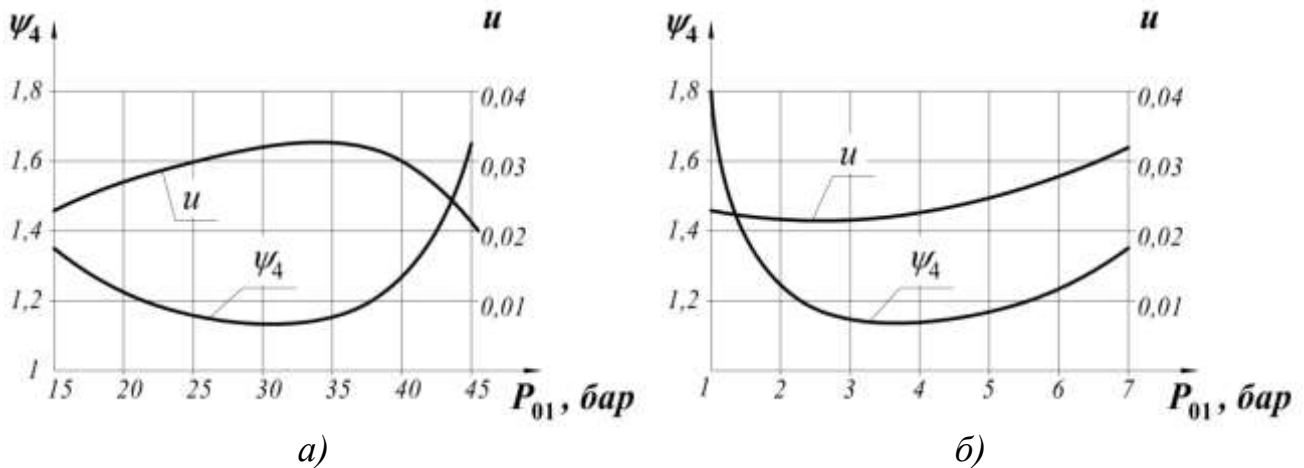


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта інжекції u та ступеню перевиробництва пари ψ_4 від тиску робочої рідини на вході у сопло активного потоку P_0 :
а) – дані розрахунку РПСК, б) – дані розрахунку РПЕ

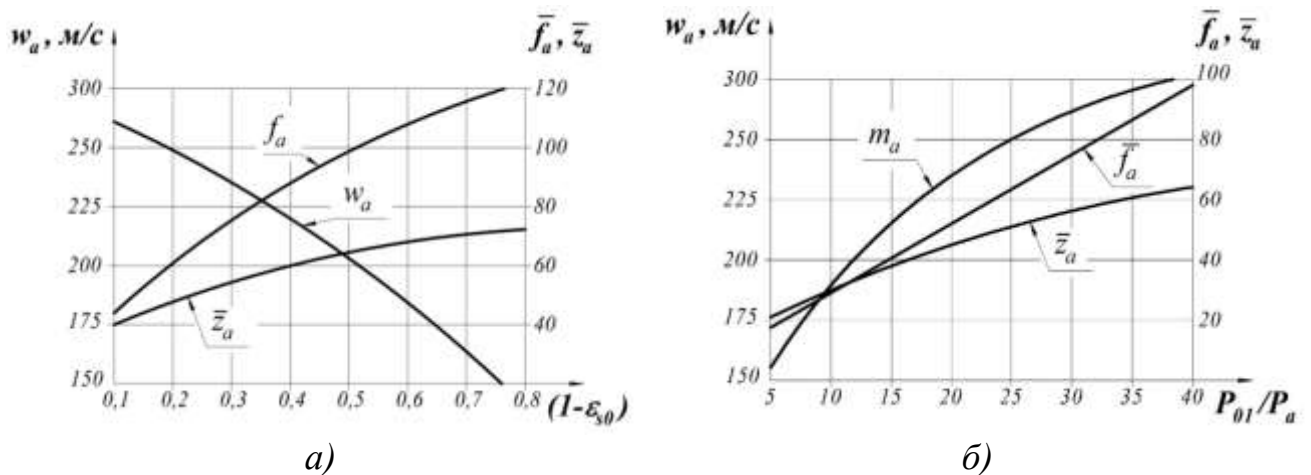


Рисунок 3 – Залежність режимних і геометричних параметрів на виході з сопла активного потоку від: а) – початкового відносного недогріву, б) – ступеню розширення робочої рідини активного потоку

Для розрахунку камер змішування застосовується рівняння імпульсів

$$I_F = \int_{\bar{f}_3}^{\bar{f}_k} p df = \frac{1}{2} (\bar{f}_k - \bar{f}_3) \cdot \left(\frac{P_1}{P_3} + \frac{P_2}{P_3} \right) \cdot P_3 \quad (8)$$

і збереження маси стаціонарного руху

$$w_3 = \frac{1+u}{\bar{f}_3} \cdot \frac{\nu_3}{\nu_a} \cdot w_a, \quad (9)$$

де \bar{f}_κ – основний геометричний параметр у вхідному перерізі камери змішування, \bar{f}_3 – основний геометричний параметр у вихідному перерізі камери змішування, p_1 – тиск робочої речовини активного потоку на вході в ежектор, P_a , p_1 – тиск робочої речовини активного потоку у критичному перерізі сопла, P_a , p_3 – тиск змішаного потоку на виході з камери змішування, P_a , u – коефіцієнт інжекції, ν_a – питомий об'єм робочої речовини активного потоку на виході з сопла, $\text{м}^3/\text{кг}$, ν_3 – питомий об'єм змішаного потоку на виході з камери змішування, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Коефіцієнт інжекції визначається виходячи із двох можливих схем положення вихідного перерізу сопла активного потоку відносно перерізу входу у камеру змішування.

Для першої схеми характерна рівність тисків активного потоку на виході з сопла і пасивного потоку на вході у камеру змішування. Коефіцієнт інжекції у цьому випадку визначається за виразом:

$$u = 2 \cdot b_1^0 \cdot \left((1 + b_1^0 \cdot (1 - I_1)) \cdot I_2 - b_1^0 \cdot I_3 \right) + (1 - b_1^0 \cdot I_1)^2 - 1, \quad (10)$$

де b_1 – константа пароутворення, I_1 – імпульс робочої рідини активного потоку на вході в ежектор, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$, I_2 – імпульс робочої рідини пасивного потоку на вході в камеру змішування, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$, I_3 – імпульс змішаного потоку на виході з камери змішування, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$.

Друга схема має місце при переміщенні вихідного зрізу сопла активного потоку всередину камери змішування. При цьому має місце рівність швидкостей активного потоку на виході з сопла і пасивного потоку на вході у камеру змішування. Для визначення коефіцієнту інжекції справедлива формула:

$$u = \left(\bar{f}_\kappa - 1 \right) \cdot \left(\frac{\nu_a}{\nu_n} \right), \quad (11)$$

де ν_n – питомий об'єм робочої речовини пасивного потоку на вході в камеру змішування, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Проаналізувавши вплив температури пасивного потоку на вході у приймальну камеру на основні геометричні параметри камери змішування, можна зробити висновок, що використання перегрітої пари веде до більш швидкісних режимів роботи РПЕ і збільшення його геометричних розмірів, що пов'язано з необхідністю більшого часу для вирівнювання параметрів пасивного потоку у камері змішування (рис. 4).

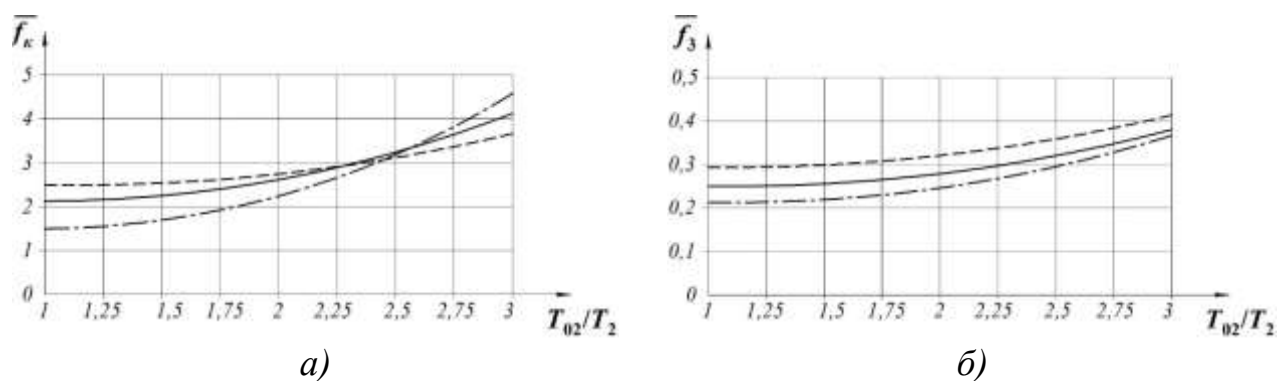


Рисунок 4 – Вплив температури пасивного потоку на вході у приймальну камеру ($P_a = P_{02} = 0,05$ бар, $T_{02} = 30\text{--}100^\circ\text{C}$) на основний геометричний параметр камери змішування: а) на вході, б) на виході
 - · - · - · - $P_{01} = 2$ бар, — — — — $P_{01} = 4$ бар, - - - - - $P_{01} = 6$ бар

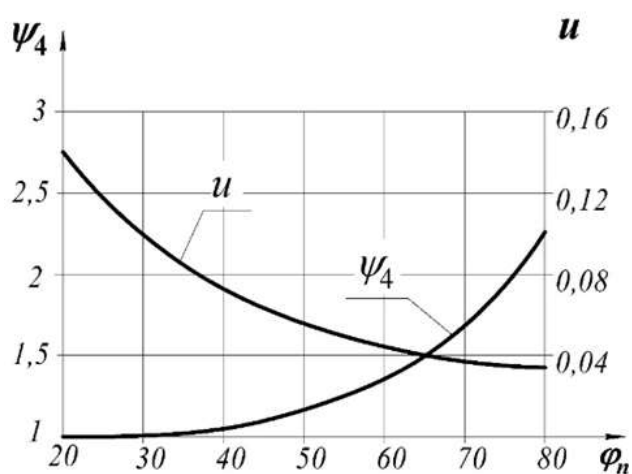


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта інжекції u та ступеню перевиробництва пари ψ_4 від відносної вологості повітря ϕ_n пасивного потоку ($P_a = P_{02} = 0,2$ бар)

з ежектора до значення $\psi_4 = 1$, тим самим зменшуючи коефіцієнт інжекції (рис. 5).

При використанні РПЕ з камерами змішування різної геометричної форми (циліндричні і конічні) виявлено, що циліндричні камери дають можливість отримати незначний перепад тисків пасивного потоку і застосовуються головним чином там, де необхідно підвищити швидкість суміші без істотного підвищення тиску. Камери змішування конічної форми, навпаки, дають можливість значно підвищити тиск робочої рідини пасивного потоку і завдяки наявності циліндричної ділянки, отримати на виході з неї двофазну суміш однорідної гомогенної структури (рис. 6).

Ексергетичний аналіз ефективності робочого процесу РПЕ показав, що його застосування дає змогу отримати значну ефективність процесу вакуумування у широкому діапазоні робочих параметрів (рис. 7).

У третьому розділі «Експериментальне дослідження рідинно-парового ежектора, що працює у режимі вакуумування» подано опис експериментальної установки для дослідження РПЕ вакуумного агрегату,

Застосування різних робочих речовин пасивного потоку також впливає на робочий процес РПЕ. Так, чим більший ступінь перегрівості пари, тим більше позначається різниця між ідеальним та реальним процесом змішування. При застосуванні в якості робочої речовини пасивного потоку пароповітряної суміші, разом з іншими будуть відбуватися процеси насичення повітря вологою, тим самим зменшуючи вміст пари у активному потоці. В залежності від кількості повітря у пароповітряній суміші цей процес може зменшити ступінь перевиробництва пари на виході

приладів для вимірювання температури у проточній частині РПЕ, виконано оцінювання похибок прямих і непрямих вимірювань, викладено результати експериментальних досліджень робочого процесу РПЕ.

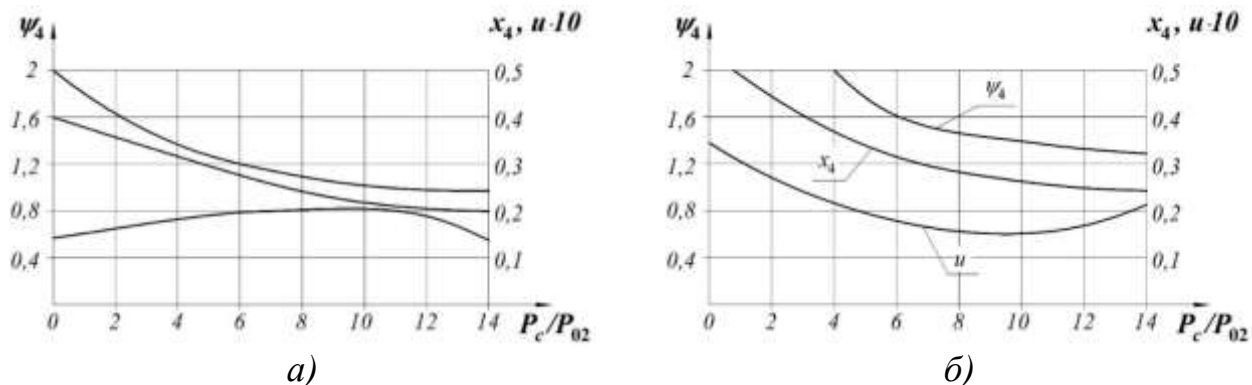


Рисунок 6 – Залежність вмісту пари x_4 , перевиробництва пари ψ_4 та коефіцієнту інжекції u від ступеню підвищення тиску пасивного потоку:
а) – циліндрична камера, б) – конічна камера

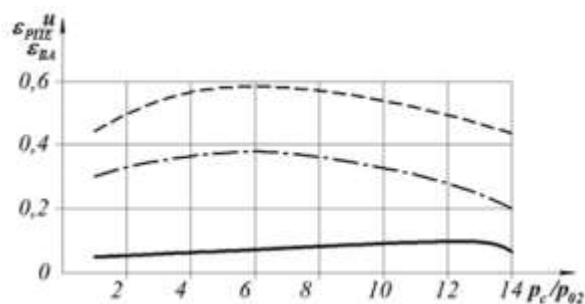


Рисунок 7 – Залежність показників ефективності РПЕ від ступеню підвищення тиску пасивного потоку ($P_{01} = 4$ бар, $P_a = P_{02} = 0,2$ бар):
— — коефіцієнт інжекції, - - - - ексергетична ефективність РПЕ,
- · - · - · - ексергетична ефективність вакуумного агрегату

У результаті експериментального дослідження процесів у каналі, що розширюється, з витіканням робочої рідини у вакуум, підтверджено характер пароутворення з наявністю критичних перерізів і зміни їх положення при зміні початкових термодинамічних параметрів активного потоку (рис. 8).

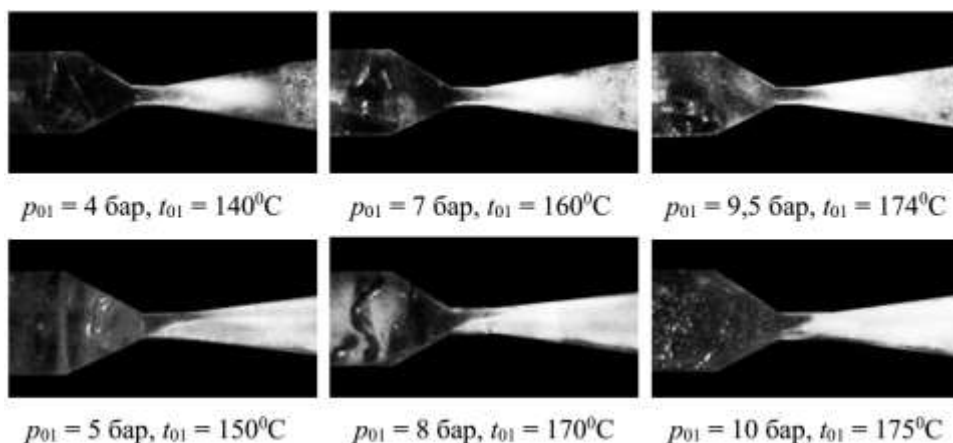


Рисунок 8 – Положення критичних перерізів при витіканні закипаючої рідини з каналів, що розширюються, до тисків менших за атмосферний

Метою подальших експериментальних досліджень було визначення діапазону початкових параметрів робочої рідини активного потоку, при яких спостерігається максимальна ефективність витікання закипаючої, недогрітої до насичення, рідини з каналів, що розширюються. Як показано на рис. 9, такий діапазон спостерігається при значеннях відносного початкового недогрівання на рівні 0,2–0,4.

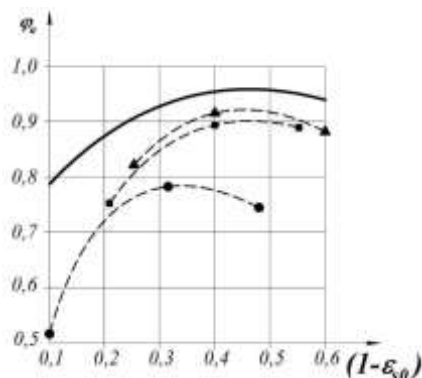


Рисунок 9 – Експериментальна залежність коефіцієнта швидкості сопла активного потоку від величини відносного початкового недогрівання робочої рідини ($P_{01} = 3\text{--}10$ бар, $T_{01} = 130\text{--}175^{\circ}\text{C}$, $P_a = 0,5\text{--}1,0$ бар)

Характер процесу змішування активного і пасивного потоків досліджувався у камерах змішування різної геометричної форми. Вони були циліндричними та конічними з подальшою циліндричною ділянкою. Кут конфузорності конічних камер змішування знаходився у межах $5\text{--}12^{\circ}$.

При дослідженні циліндричних та конічних камер змішування було виявлено залежність величини вакууму у вхідному перерізі камери змішування від величини відносного початкового недогрівання (рис. 10). Було визначено граничну величину вакууму, яка може бути створена у камері змішування циліндричної форми. Так, при початкових параметрах робочої рідини активного потоку $P_{01} = 4\text{--}8$ бар і $t_{01} = 120\text{--}160^{\circ}\text{C}$, максимальний вакуум на вході в приймальну камеру складає $P_{02} = 52\text{--}85$ кПа. Для конічної камери при одних і тих самих P_{01} і t_{01} було досягнуто вакуум на рівні $P_{02} = 45\text{--}52$ кПа

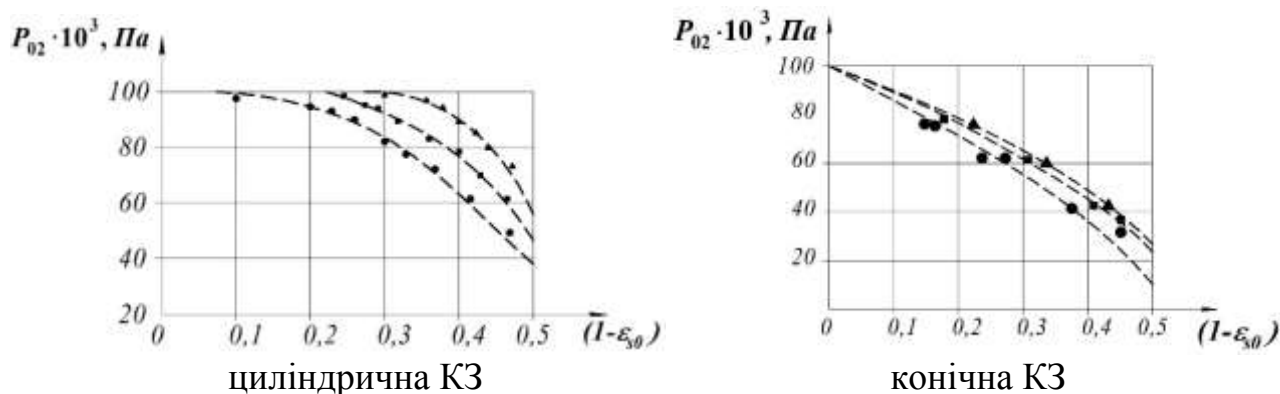


Рисунок 10 – Експериментальна залежність тиску пасивного потоку у вхідному перерізі камери змішування P_{02} від величини відносного початкового недогрівання: \blacktriangle — $P_{01} = 4$ бар, \blacksquare — $P_{01} = 6$ бар, \bullet — $P_{01} = 8$ бар

На основі експериментального дослідження робочого процесу РПЕ вакуумного агрегату з камерами змішування різної геометричної форми отримано залежність досяжних показників ефективності (вміст пари x_4 , перевиробництво пари ψ_4 та коефіцієнт інжекції u) від відношення тисків P_c/P_{02} (рис. 11).

Як видно з рис. 11 *а*, діапазон ефективної роботи РПЕ з циліндричною камерою змішування при вказаних вище початкових параметрах робочої рідини активного потоку знаходиться в інтервалі $P_c/P_{02} = 4-6$.

Перехід від циліндричних камер змішування до конічних з подальшою циліндричною ділянкою дає змогу досягти більш значної глибини вакууму (рис. 11 *б*). Використовуючи їх у РПЕ, робочий процес якого базується на принципі СТК, заснованому на змішуванні двох докритичних потоків, можна уникнути граничних режимів роботи ежектора і «запирання» камери змішування. Дослідивши конічні камери змішування з різними кутами конфузорності (рис. 11 *б*), можна зробити висновок, що найбільш ефективно процес змішування відбувається у камерах з кутами конфузорності $4-8^\circ$ у діапазоні тисків робочої речовини пасивного потоку $P_{02} = 4-9$ бар.

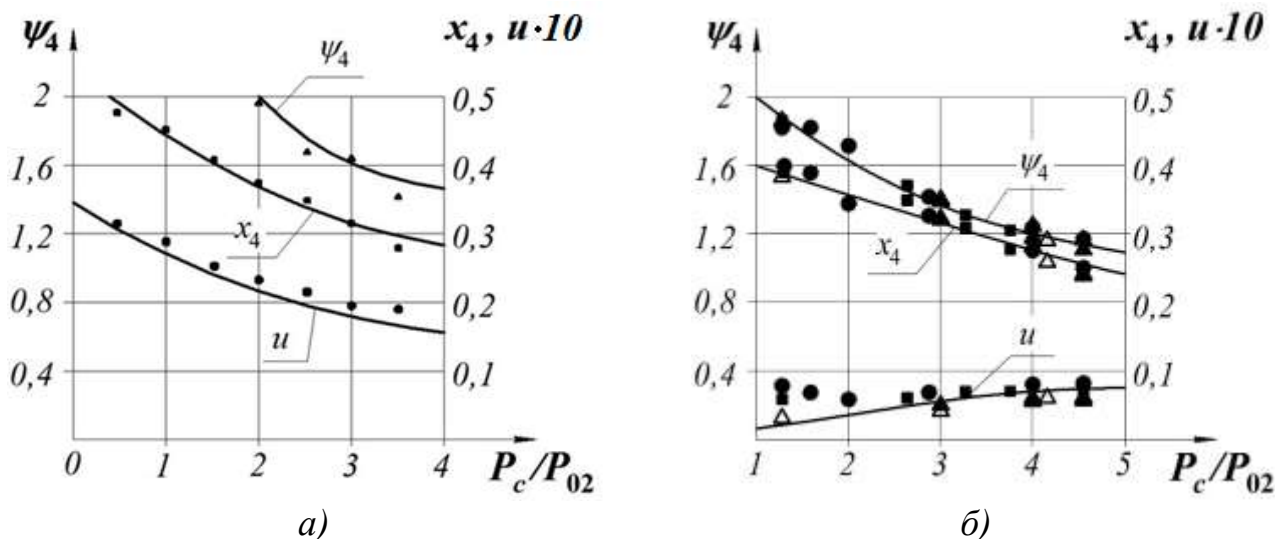
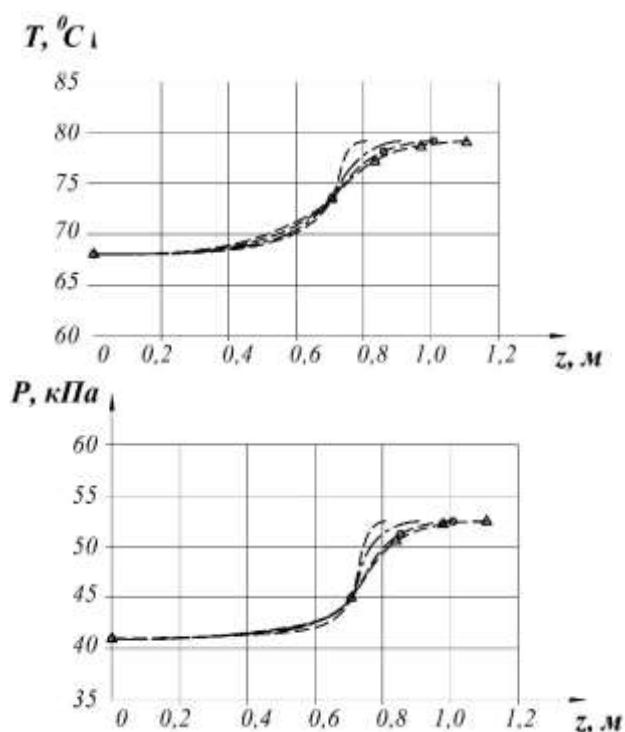


Рисунок 11 – Експериментальна залежність вмісту пари x_4 , перевиробництва пари ψ_4 та коефіцієнта інжекції u від ступеню підвищення тиску пасивного потоку: *а*) циліндрична камера \bullet – $P_{01} = 4$ бар, \blacksquare – $P_{01} = 6$ бар, \blacktriangle – $P_{01} = 8$ бар, *б*) конічні камери з кутами конфузорності $-\cdot-\cdot-$ 2° , $-\cdot-\cdot-$ 4° , $-\square-\square-\square-$ 6° , $-\triangle-\triangle-\triangle-$ 8° .

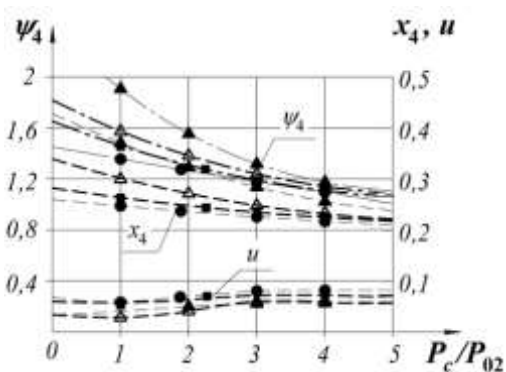
При дослідженні РПЕ з конічними камерами змішування, велика увага приділялася довжині циліндричної ділянки, яка розташовується після конічної. Необхідність її наявності у конструкції РПЕ пов'язана з тим, що для утворення двофазного змішаного потоку недостатньо однієї конфузорної частини, в якій відбувається лише розпадання крапельної структури робочої рідини активного потоку та її змішування з робочою речовиною пасивного потоку. Для отримання необхідних параметрів потоку на виході з камери змішування та

запобігання утворенню режиму «запирання» у ній, необхідно правильно визначити довжину циліндричної ділянки.

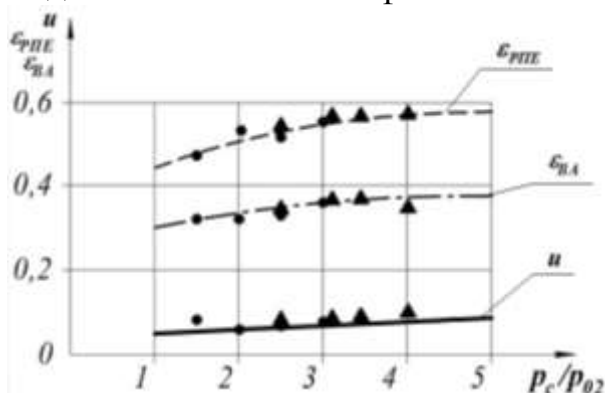
Експериментально було досліджено конічні камери змішування з циліндричною ділянкою довжиною (4–6) d_3 та без неї (рис. 12). При застосуванні конічної камери змішування без подальшої циліндричної ділянки, на виході з неї має місце неоднорідний двофазний потік, у якому ще не встигли встановитися сталі параметри (p_3 , T_3). Якщо ж застосовувати конічну камеру змішування із подальшою циліндричною ділянкою довжиною більше $8 d_3$, то у ній стають значними зворотні течії, що призводять до виникнення режиму «запирання» камери. Дослідження конічних камер змішування із циліндричною ділянкою довжиною (4–6) d_3 показали, що їх застосування дає змогу ефективно здійснити процес змішування робочих речовин активного і пасивного потоків у РПЕ.



профілі температур і тисків
у різних перерізах камери змішування
- - - - $l_y = 3 d_3$, - · - · - $l_y = 4 d_3$,
-○-○-○- $l_y = 5 d_3$, -△-△-△- $l_y = 6 d_3$



досягні показники ефективності



ексергетична ефективність РПЕ
та вакуумного агрегату

Рисунок 12 – Результати експериментального дослідження конічних камер змішування із подальшими циліндричними ділянками різної довжини

У четвертому розділі «Оцінювання енергоефективності установок на базі рідинно-парового ежектора у складі вакуумного агрегату» виконано аналіз ефективності використання РПЕ у вакуумних установках з відкачування насиченої та перегрітої пари, а також пароповітряної суміші і подано рекомендації по вибору режимних параметрів їх робочого процесу.

Виконаний ексергетичний аналіз ефективності застосування РПЕ у вакуумних установках за методикою Дж. Тсатсароніса показав, що завдяки їх використанню можливе підвищення ефективності існуючих вакуумних систем і підтвердив перспективність використання РПЕ при проектуванні нових вакуумних установок.

Ексергетична ефективність визначається як відношення ексергії потоку продукту E_P до ексергії потоку палива E_F системи:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{E_P}{E_F} \quad (12)$$

Для рідинно-парового ежектора в якості ексергії потоку продукту розглядається різниця ексергії насиченої пари на виході з сепаратора і ексергії пасивного потоку на вході до рідинно-парового ежектора. У якості ексергії потоку палива розглядається різниця ексергії активного потоку на вході до рідинно-парового ежектора і ексергії рідини на виході з сепаратора.

Для вакуумного агрегату в якості ексергії потоку продукту, так само як і для рідинно-парового ежектора, розглядається різниця ексергії насиченої пари на виході з сепаратора і ексергії пасивного потоку на вході до рідинно-парового ежектора. Ексергія потоку палива є сумою споживаної потужності циркуляційного насоса і ексергії потоку теплоносія в теплообміннику-підігрівачі.

При виборі режимних параметрів вакуумного агрегату на базі РПЕ необхідно, в першу чергу, досягти максимального рівня його ексергетичної ефективності. Для цього необхідно мінімізувати навантаження на теплообмінник-підігрівач і зменшити потужність циркуляційного насоса при збереженні високого значення ККД вакуумного агрегату.

Навантаження на теплообмінник-підігрівач від холодного теплоносія визначається різницею між температурою рідини на вході у сопло активного потоку РПЕ і температурою рідкої фази на виході з сепаратора, а також масовою витратою робочої рідини активного потоку на вході у РПЕ, який у подальшому визначає коефіцієнт інжекції апарату. З боку гарячого теплоносія навантаження визначається масовою витратою котельної пари, яка необхідна для нагрівання робочої рідини активного потоку. Для того, щоб зменшити навантаження з боку холодного теплоносія, необхідно мінімізувати величину відносного початкового недогрівання рідини, яка подається у сопло активного потоку РПЕ.

Потужність, яку споживає циркуляційним насосом, залежить від напору, який він створює. Напір циркуляційного насоса визначається величиною тиску робочої рідини на вході у сопло активного потоку. Застосування РПЕ дає можливість перейти на помірні початкові параметри робочої рідини на вході у ежектор, що дозволяє зменшити відношення тиску робочої рідини на вході у сопло активного потоку до тиску рідини на виході з сепаратора. Подача циркуляційного насоса визначається масовою витратою робочої рідини активного потоку, яка, у свою чергу, визначається коефіцієнтом інжекції РПЕ.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічне завдання, що полягає у визначенні закономірностей впливу термодинамічних і геометричних параметрів на ефективність робочого процесу сопла активного потоку, характеру процесів змішування і РПЕ в цілому, що дозволило удосконалити вакуумні агрегати на базі РПЕ.

Реалізація мети й завдань дослідження дає підстави зробити такі висновки.

1. Розроблено математичну модель розрахунку робочого процесу РПЕ вакуумного агрегата, що дозволяє визначити параметри ефективності як окремих елементів, так і апарата в цілому, яка враховує:

а) розширення робочої рідини активного потоку у вихідному перерізі сопла до тисків, нижчих за атмосферний;

б) перехід на більш низькі значення початкових параметрів робочої рідини активного потоку ($P_{01} = 3\text{--}10 \text{ бар}$, $T_{01} = 130\text{--}175^\circ\text{C}$) із збереженням високої ефективності витікання недогрітої до насичення рідини з каналів, що розширюються ($\varphi_a = 0,768\text{--}0,917$);

в) більш значущу різницю термодинамічних параметрів змішуваних потоків при зміщенні в область тисків, нижчих за атмосферний (ентальпія, ентропія, ступінь сухості, питомий об'єм);

г) можливість застосування у якості пасивного потоку середовищ із різними термодинамічними властивостями;

д) розрахунок РПЕ з камерами змішування різної геометричної форми і конструктивних виконань (з дифузором і без нього).

2. Під час експериментального дослідження сопла активного потоку ($P_{01} = 3\text{--}10 \text{ бар}$, $T_{01} = 130\text{--}175^\circ\text{C}$, $(1 - \varepsilon_{s0}) = 0,1\text{--}0,5$) у діапазоні початкових параметрів робочої рідини активного потоку підтверджено характер зміни параметрів робочої рідини активного потоку, при витіканні її з каналів, що розширюються, в області тисків, нижчих за атмосферний $P_{02} = 0,45\text{--}0,85 \text{ бар}$, з можливістю досягнення максимальної ефективності ($\varphi_a = 0,768\text{--}0,917$).

3. Експериментально досліджено характер впливу конструктивних і режимних параметрів на рівень досяжного вакууму в камерах змішування різної геометричної форми і доведена можливість досягнення максимальних показників ефективності шляхом оптимізації проточної частини ($\alpha_\kappa = 4\text{--}8^\circ$, $P_4/P_{02} = 2\text{--}3,5$ – для циліндричної, $P_4/P_{02} = 2,5\text{--}4$ – для конічної).

4. Шляхом уточнення математичної моделі внаслідок експериментальних досліджень і введення відповідних коефіцієнтів, встановлено діапазон параметрів робочих середовищ активного і пасивного потоків ($P_4/P_{02} = 4\text{--}9$), що забезпечують максимальну ефективність РПЕ вакуумного агрегату ($u = 0,03\text{--}0,1$, $\varepsilon_{РПЕ} = 0,45\text{--}0,55$, $\varepsilon_{ВА} = 0,3\text{--}0,38$).

5. Виконано ексергетичний аналіз вакуумних установок на базі РПЕ, які ежектують насичену, перегріту водяну пару і пароповітряну суміш, їх порівняння з існуючими установками на базі пароструминних ежекторів з визначенням показників ефективності впровадження нової техніки, яка

підвищується в 1,85–3,05 рази. Та за результатами цього аналізу виконано оптимізацію існуючих вакуумних систем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Marchenko V. N. Principle of stream thermocompression: conception of energetic efficiency and prospect of realization is in small heat energetic [Text] / V. N. Marchenko, V. A. Osipov, M. G. Prokopov, S. O. Sharapov // «MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa». – Simferopol-Lublin, 2009. – Volume 11 A. – S. 70–76.

Особистий внесок: числовий розрахунок характеристик і показників установки, що працює за принципом струминної компресії, обробка результатів, підготовка матеріалів до публікації.

2. Шарапов С. О. Задачи экспериментальных исследований рабочего процесса жидкостно-парового эжектора в вакуумном режиме и их техническое содержание [Текст] / С. О. Шарапов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 51–57.

Особистий внесок: огляд літературних джерел, аналіз інформації, опис експериментальної установки та методики проведення експерименту, підготовка матеріалів до публікації.

3. Арсеньев В. М. Влияние масштабного фактора на эффективность жидкостно-парового струйного компрессора [Текст] / В. М. Арсеньев, С. О. Шарапов, М. Г. Прокопов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2 (24). – С. 40–43.

Особистий внесок: експериментальне дослідження рідинно-парового струминного компресора, обробка результатів експерименту, підготовка матеріалів до публікації.

4. Арсеньев В. М. Исследование рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в режиме вакуумирования [Текст] / В. М. Арсеньев, С. О. Шарапов, М. Г. Прокопов // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. – № 4 (34). – С. 3–6.

Особистий внесок: опис математичної моделі рідинно-парового ежектора, числовий розрахунок характеристик і показників його робочого процесу, обробка результатів, підготовка матеріалів до публікації.

5. Арсеньев В. М. Оценка энергетической эффективности жидкостно-парового эжектора, применяемого для создания вакуума в металлургии [Текст] / В. М. Арсеньев, С. О. Шарапов, М. Г. Прокопов // Холодильна техніка і технологія. – 2011. – №5 (133). – С. 62–66.

Особистий внесок: опис математичної моделі рідинно-парового ежектора, числовий розрахунок характеристик і показників його робочого процесу, підготовка матеріалів до публікації.

6. Арсеньев В. М. Оценка энергоэффективности вакуумной установки с применением жидкостно-парового струйного эжектора [Текст] /

В. М. Арсеньєв, С. О. Шарапов, Н. А. Борисов // Сталий розвиток і штучний холод. – Одеса, 2012. – С. 355–359.

Особистий внесок: розробка схеми дезодорації рослинних олій на базі рідинно-парового ежектора, числовий розрахунок характеристик і показників його робочого процесу, підготовка матеріалів до публікації.

7. Арсеньєв В. М. Застосування рідинно-парового ежектора для рекомпресії вторинної пари вакуумних випарних установок [Текст] / В. М. Арсеньєв, С. О. Шарапов, В. В. Мірошніченко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков, 2013. – № 2. – С. 57–64.

Особистий внесок: розробка схеми рекомпресії вторинної пари випарних вакуумних установок на базі рідинно-парового ежектора, числовий розрахунок характеристик і показників його робочого процесу, підготовка матеріалів до публікації.

8. Sharapov S. O. The use of liquid-vapor ejector in vacuum systems [Text] / S. O. Sharapov, V. M. Arsenyev, M. I. Protsenko // Refrigeration Science and Technology : Proceedings. – France/Slovakia, IIF-IRR, 2013. – №4.

Особистий внесок: огляд літературних джерел, опис математичної моделі рідинно-парового ежектора, числовий розрахунок характеристик і показників його робочого процесу, розрахунок показників ефективності застосування рідинно-парового ежектора у технологічних процесах, підготовка матеріалів до публікації.

9. Шарапов С. О. Экспериментальное исследование жидкостно-парового эжектора с цилиндрической камерой смешения [Текст] / С. О. Шарапов, В. М. Арсеньев // Холодильна техніка і технологія. – 2016. – Том 52, випуск 2. – С. 87–92.

Особистий внесок: обробка і аналіз результатів експериментальних досліджень рідинно-парового ежектора з циліндричною камерою змішування, підготовка матеріалів до публікації.

10. Sharapov S. Experimental investigation of liquid-vapor ejector with conical mixing chamber [Text] / S. Sharapov, V. Arsenyev, V. Kozin // Technology audit and production reserves. – 2016. - №4/1 (30). – P. 50–55.

Особистий внесок: обробка і аналіз результатів експериментальних досліджень рідинно-парового ежектора з конічною камерою змішування, підготовка матеріалів до публікації.

11. Sharapov S. O. Application of jet thermal compression for increasing the efficiency of vacuum systems [Text] / S. O. Sharapov, V. M. Arsenyev, V. M. Kozin // IOP Conference Series: “Materials Science and Engineering”. – 2017. – Vol. 233.

Особистий внесок: огляд літературних джерел, обробка і аналіз результатів числового та експериментального дослідження рідинно-парового ежектора, розрахунок показників ефективності застосування рідинно-парового ежектора, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Шарапов С. О. Удосконалення вакуумних агрегатів на базі рідинно-парових ежекторів. – На правах рукопису.

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, 2017.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню робочого процесу рідинно-парового ежектора (РПЕ) вакуумного агрегату, який працює по принципу струминної термокомпресії, дослідженню впливу термодинамічних параметрів і характеристик активного і пасивного потоків на процес змішування з метою отримання найбільшої ефективності агрегату.

Основним змістом дисертації є вдосконалення математичної моделі і методики розрахунку робочого процесу РПЕ для вакуумного режиму роботи, визначення діапазону початкових параметрів робочої рідини активного потоку, при яких можливе досягнення максимальної ефективності її витікання через канали, що розширюються, та закономірностей впливу початкових параметрів робочої речовини пасивного потоку на вході у приймальну камеру і геометричних параметрів камери змішування на характер змішування активного і пасивного потоків. Експериментальне дослідження РПЕ на прозорій моделі дало змогу підтвердити механізм протікання робочого процесу в області тисків нижче за атмосферний і встановити можливість досягнення максимальної ефективності шляхом оптимізації проточної частини РПЕ.

Ключові слова: рідинно-паровий ежектор, вакуумний агрегат, струминна термокомпресія, математична модель, ефективність.

ABSTRACT

Sharapov S. O. Perfection of vacuum units on the basis of liquid-vapor ejectors. – The 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, MESYS of Ukraine, Odessa, 2017.

Thesis is devoted the design of working process of liquid-vapor ejector (LVE) of a vacuum aggregate, working on principle of stream thermocompression, research of influence of thermodynamic parameters and descriptions of active and passive streams on the process of mixing with the purpose of achievement of most vacuum unit efficiency.

The main content of the thesis is improving mathematical model and calculation method of LVE workflow for vacuum mode, which is a system of equations of conservation of mass, momentum, energy, state of the environment and the entropy production in an integrated form, and is complemented by dependencies on the kinetics of vaporization characteristics crushing and a polydisperse distribution of the liquid phase and the critical regime. The adequacy of the resulting model is confirmed by the results of experimental studies on the expiration of the expanding

channel metastable superheated liquid at pressures below atmospheric and study the nature of passive mixing flows with different thermodynamic properties on the geometric parameters of the mixing chamber.

The theoretical study of LVE workflow that describe the impact of the initial parameters of the active thread on the performance indicators of the working nozzle, give an idea about the use of different operating environments of the passive flow (saturated and superheated steam, steam-air mixture) and the nature of the mixing process with the change of their thermodynamic parameters. Applications received by the mathematical model for calculating the mixing chambers of various geometric shapes to evaluate the effectiveness of their use for specific conditions.

Exergy analysis of LVE as apart, and then the vacuum unit as a whole, led to the conclusion of the feasibility of its use in vacuum systems in a wide range of operating parameters with a high degree of efficiency.

Experimental study of LVE on a transparent model allowed to confirm the mechanism of the working process at pressures below atmospheric pressure, namely the boiling of metastable superheated liquid, characterized by the presence of three critical sections expiry of expanding the channels to the definition section of flow separation from the walls of the channel and its position relative to the nozzle exit active thread. Also investigated the nature of the mixing process in the cells of cylindrical and conical shape, allowing the possibility to establish maximum efficiency by optimizing the flow of LVE.

The estimation of the appropriateness of units on the basis LVE in vacuum systems, bilge saturated steam, superheated steam and steam mixture through a comparative analysis of exergy base and schemes offered by the method of J. Tsatsaronis.

Keywords: liquid-vapor ejector, vacuum unit, stream thermocompression, mathematical model, efficiency.

Підписано до друку 12.12.2007

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №956

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2. м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007