

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕРЗЛЯКОВ ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК [621.527+621.517]: 532.529 (043.3)

**РОБОЧИЙ ПРОЦЕС РІДИННО-ПАРОВОГО
СТРУМИННОГО АПАРАТА ВИХРОВОГО ТИПУ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Сумському державному університеті Міністерства 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, старший науковий
співробітник
ПАРАФІЙНИК Володимир Петрович,
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО»,
провідний науковий співробітник СКБ;

кандидат технічних наук
БЕРЕЖНИЙ Олександр Сергійович,
ПАТ «Технологія», інженер-технолог
відділу керівництва виробництвом.

Захист відбудеться «08» червня 2018 року о 10:00 годині в ауд. ЛА 213 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету (вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна).

Автореферат розіслано «04» травня 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 55.051.03,
кандидат технічних наук, доцент



Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За достатньо довгий період, що минув з моменту створення струминних апаратів, досягнутий значний прогрес як в області вдосконалення конструкцій апаратів, так і в розробці методів розрахунку та розширенні сфери їх застосування. Струминні апарати застосовуються для перекачування сумішей, рідин та газів, створення і підтримки вакууму, змішування рідких, твердих і газоподібних середовищ тощо. Так, в останні роки зросла потреба низки галузей промисловості у застосуванні вакуумних установок, що мають малу продуктивність і забезпечують помірне підвищення тиску вакуумуючого середовища. У зв'язку з цією необхідністю особливий інтерес представляє здатність вихрових апаратів до самовакуумування, що дозволило створювати на цій основі вихрові вакуум-насоси. Створюваний у таких апаратах вакуум забезпечує інтенсивне відкачування газу із вакуумованого об'єму за рахунок створення біля осі апарату області розрідження.

Розширення функціональних можливостей струминних апаратів, у тому числі для цілей вакуумування, можливе шляхом комбінування прямоструминних та вихрових апаратів на базі рідинно-парового струминного апарата (РПСА), що працює за принципом струминної термокомпресії. Інжектування пари низького тиску у РПСА проводиться робочим струменем, який формується за рахунок скипання недогрітої до насичення рідини, що подається у сопло активного потоку. У той же час, при створенні РПСА з порівняно невеликою продуктивністю виникає проблема, пов'язана із впливом масштабного чинника на умови розвитку скипаючого потоку у каналі робочого сопла, що призводить до збільшення поздовжніх розмірів каналу сопла, що розширюється, та істотно позначається на масогабаритних показниках апарата в цілому.

Відповідно до вищезазначеного, пропонується організувати процес релаксаційного пароутворення для створення вакуумуючої здатності РПСА за допомогою вихрового принципу енергетичної взаємодії між активним і пасивним потоками. На відміну від прямоосних скипаючих потоків, моделювання процесу пароутворення в умовах адіабатних вихрових течій носить більш складний характер з огляду на домінування інерційних сил у механізмі зародження та зростання парової фази. Крім того, для проектування РПСА вихрового типу необхідно створити відповідну методику розрахунку. Аналіз сучасних досліджень показує, що вивчення робочого процесу, створення теплофізичної моделі та методики розрахунку РПСА вихрового типу є актуальними проблемами і має практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалось у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт № 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), а також НДР на тему «Дослідження робочих процесів енергетичних машин» № 0110U004210.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розширення функціональних можливостей рідинно-парових струминних апаратів шляхом застосування процесу скипання рідини у вихровому потоці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- створити теплофізичну модель процесів, що відбуваються у вихровому потоці скипаючої рідини;
- уточнити математичну модель процесу релаксаційного пароутворення у вихровому потоці на основі встановлення характеру та особливостей процесів, що відбуваються у проточних частинах РПСА вихрового типу;
- провести теоретичні та експериментальні дослідження і встановити закономірності впливу початкових термічних і геометричних параметрів на ефективність процесу пароутворення у вихровому потоці;
- розробити методику розрахунку геометричних параметрів РПСА вихрового типу;
- отримати експериментальні характеристики РПСА вихрового типу.

Об'єкт дослідження – робочий процес у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу.

Предмет дослідження – взаємозв'язок енергетичних та витратних показників з геометричними параметрами РПСА вихрового типу.

Методи дослідження. Поставлені завдання дослідження вирішувались за допомогою розрахунково-аналітичного методу, теплофізичного та математичного моделювання, фізичного експерименту.

Розрахунково-аналітичний метод базується на класичних законах термодинаміки і газодинаміки. За його допомогою виконаний аналіз науково-технічної інформації та сформульовані мета і завдання дослідження.

У результаті теплофізичного моделювання створено модель течії скипаючої рідини у вихровому потоці.

Математичне моделювання здійснювалось за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX, в основу якого закладені методи числового розв'язання рівнянь гідродинаміки, моделювання і візуалізації тривимірних течій рідин та газів у технічних об'єктах, що забезпечує обґрунтованість використання отриманих результатів.

Фізичний експеримент передбачав експериментальне дослідження витратних та енергетичних характеристик рідинно-парового струминного апарата вихрового типу; вимірювання полів тиску і температури та визначення напрямку потоку в характерних перерізах проточних частин РПСА вихрового типу; дослідження впливу геометричних та режимних параметрів на витратні та енергетичні характеристики РПСА вихрового типу.

Достовірність отриманих експериментальних даних забезпечується використанням загальноприйнятих на практиці методик проведення експериментальних досліджень та допустимою похибкою вимірювання фізичних параметрів. Достовірність отриманих у роботі теоретичних результатів оцінюється шляхом їх порівняння з експериментальними даними.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вперше для вихрових апаратів, що працюють на скипаючій рідині, сформульована та експериментально підтверджена теплофізична модель кипіння рідини у полі відцентрових сил, що дозволило уточнити фізичну картину процесів у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу;

- вперше отримані експериментальні характеристики рідинно-парового струминного апарата вихрового типу;

- вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив косою зрізу сопла активного потоку на формування робочого вихрового потоку у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу, що дозволило розробити сопло з кутом косою зрізу, який забезпечує плавність закрутки при незначному відхиленні потоку;

- уточнено математичну модель робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, що дозволило визначити його параметри і характеристики;

- встановлені закономірності впливу початкових термічних параметрів на ефективність процесу пароутворення у вихровому потоці, що дозволили визначити зону режимних параметрів, які відповідають максимальним значенням коефіцієнта інжекції та показникам ефективності рідинно-парового струминного апарата вихрового типу.

Практичне значення отриманих результатів:

- створено алгоритм розрахунку та здійснена програмна реалізація процесу течії скипаючої рідини у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу, що дозволяє вже на стадії проектування визначити його основні параметри і характеристики;

- створено методику інженерного розрахунку параметрів і характеристик рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, що має практичну цінність при розробці подібних апаратів;

- запропоновано спосіб релаксаційного пароутворення у рідинно-парових струминних апаратах на основі скипання рідини у вихровому потоці;

- створено експериментальний стенд для дослідження робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу;

- результати дисертаційної роботи впроваджено у ТОВ «НТЦ «Газмашкомплект» та СП «Технополіс», а також використовуються у навчальному процесі на факультеті технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ, що підтверджується відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в отриманні у процесі виконання дисертаційної роботи основних результатів, що були опубліковані у авторських статтях та статтях зі співавторами: [1, 4, 5] –

аналіз інформації, обробка результатів; [2, 3, 9, 10, 13] – огляд літературних джерел, числовий розрахунок характеристик і параметрів установки, обробка результатів; [6, 7, 11, 12, 14, 15, 16] – створення теплофізичної та уточнення математичної моделей робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, розробка експериментального стенду; опис експериментальної установки та методики проведення експерименту, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів експериментальних досліджень; [8] – розробка ідеї корисної моделі, підготовка матеріалів до подачі заявки.

Постановка мети та завдань дослідження, аналіз отриманих результатів і висновки проводились спільно із науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

- Міжнародній науково-технічній конференції «Технічні та технологічні гази. Устаткування і технології альтернативної енергетики» (м. Суми, 2011 р.);

- VII та X Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2011, 2015 р. р.);

- XIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Чернігів, 2012 р.);

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

- Науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ (м. Суми, 2011, 2013 р. р.);

- IV Міжнародній науково-практичній конференції наукової молоді і студентів «Сучасні проблеми розвитку легкої і харчової промисловості» (м. Луганськ, 2013 р.);

- XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання» – «ГЕРВІКОН+НАСОСИ-2014» (м. Суми, 2014 р.);

- XV Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Мелітополь, 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, у тому числі: 7 статей у наукових журналах (5 – у наукових фахових виданнях, затверджених наказами МОН України, 1 – у збірнику наукових праць, 1 – у журналі, що індексується науковою базою Scopus), 7 тез доповідей та 1 патент на корисну модель. Матеріали дисертаційної роботи також використовувались у звітах НДР кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 185 сторінок, у тому числі: 58 рисунків, 11 таблиць, бібліографія із 172 джерел на 17 сторінках, 5 додатків на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність проведення дослідження робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, відмічена необхідність створення теплофізичної і уточнення математичної моделей та розробки методики розрахунку робочого процесу РПСА вихрового типу; визначено об'єкт і предмет досліджень, сформульовано мету, завдання та методи дослідження; розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про апробацію та впровадження результатів роботи.

У першому розділі представлені результати інформаційно-аналітичного огляду існуючих теорій вихрового руху, способів та пристроїв для закручування потоку, моделей робочого процесу струминних та вихрових апаратів, методів та пристроїв експериментального дослідження вихрових потоків.

Не зважаючи на велику кількість експериментальних і теоретичних досліджень струминних апаратів, що працюють на скипаючій рідині, існує необхідність у розширенні їх функціональних можливостей. Ця необхідність пояснюється тим, що у процесі скипання рідини у каналі робочого сопла активного потоку розміри частинок рідкої і парової фаз не залежать від діаметру його критичного перерізу, що обумовлює збільшення розмірів каналу для завершення процесу релаксаційного пароутворення.

Збільшення часу розширення парокрапельного потоку можливе за рахунок організації процесу скипання рідини у вихровому потоці рідинно-парового струминного апарата. У цьому випадку основним елементом для релаксаційного пароутворення стає вихрова камера струминного апарата, розміри якої у багато разів перевищують розмір діаметру витратного перерізу. Однак, теплофізичне моделювання процесу пароутворення в умовах адіабатних вихрових течій має більш складний характер, на відміну від прямоосних скипаючих потоків. Домінування інерційних сил у механізмі зародження і зростання парової фази призводить до розділення потоку у вихровій камері на периферійний та приосьовий, із невпорядкованою структурою рідкої та парової фаз.

Переваги кипіння рідини у полі відцентрових сил полягають у тому, що за рахунок зростання колової швидкості потоку зменшуються розміри парових бульбашок, відповідно, збільшується частота їх відриву від поверхні тепловіддачі. Щільність центрів пароутворення на поверхні тепловіддачі також зменшується, що перешкоджає переходу від бульбашкового до плівкового кипіння і утворення криз теплообміну. По мірі просування потоку у осьовому напрямку поверхня розділу фаз буде ставати більш рівномірною і буде припинятись унесення крапель рідини, що захоплюються парою.

Проведений аналіз літературних джерел виявив, що досліджень процесу адіабатного кипіння рідини у полі відцентрових сил не проводилося. Слід зазначити, що у відомих роботах по вивченню тепловіддачі при кипінні у полі відцентрових сил криогенних і некриогенних рідин використовувався нагрівач, що забезпечував одиничний центр кипіння. Відповідно, процес кипіння

здійснювався за допомогою теплоти, підведеної від нагрівача, що принципово відрізняється від процесу адіабатного кипіння рідини у полі відцентрових сил.

На відміну від прямоосних потоків, експериментальне дослідження обертових потоків у РПСА вихрового типу пов'язане із тривимірністю потоку, його високою швидкістю і турбулентністю, а також великими радіальними градієнтами температури та тиску.

Існуючі окремі методики розрахунку вихрових і рідинно-парових струминних апаратів не дають можливості розрахувати рідинно-паровий струминний апарат вихрового типу, скипання рідини у якому може відбуватись безпосередньо у вихровій камері або за рахунок парокрапельного потоку, який утворюється у профільованому каналі перед входом до вихрової камери.

У результаті огляду літературних джерел зроблені висновки про актуальність теми дослідження, визначена мета роботи і поставлені завдання дослідження.

У **другому розділі** наведена розрахункова схема течії потоку у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу, описані основні положення теплофізичної і математичної моделей розрахунку робочого процесу РПСА вихрового типу, оцінено вплив початкових термодинамічних і геометричних параметрів на ефективність та внутрішні характеристики процесу кипіння рідини у вихровому потоці, проведено експериментальний аналіз ефективності РПСА вихрового типу.

За розрахункову схему РПСА вихрового типу (рис. 1) прийнята прямоточна схема течії вихрового потоку з інжектуванням пасивного потоку вздовж осі вихрової камери, яка складається з циліндричної вихрової камери, розділеної на три характерних розрахункових перерізи, поєднаної на вході з підведеними тангенціально двома робочими соплами активного потоку, що мають форму недорозширеного сопла Лавалю, на виході – із щілинним дифузором.

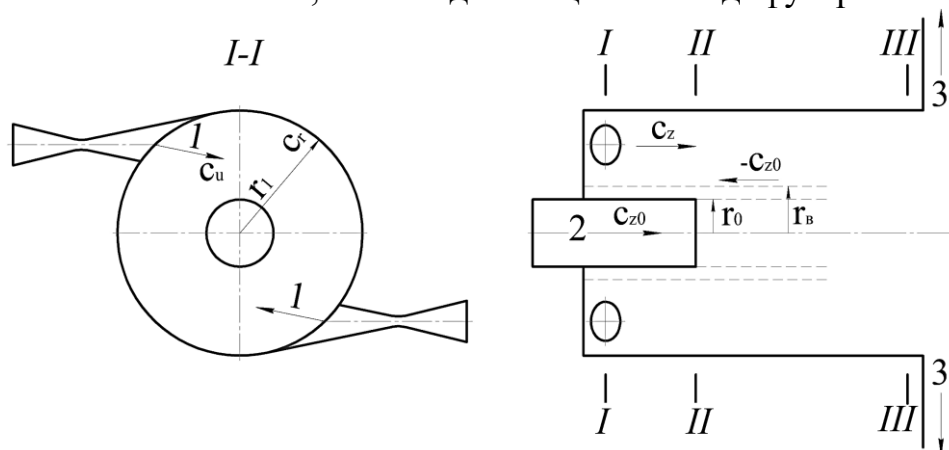


Рисунок 1 – Розрахункова схема РПСА вихрового типу:

I, II, III – характерні розрахункові перерізи вихрової камери: *I-I* – вхід активного потоку до вихрової камери; *II-II* – переріз сталої вихрової течії; *III-III* – вихід змішаного активного і пасивного потоків; *1, 2, 3* – напрямки течії активного, пасивного і змішаного потоків; c_u, c_z, c_r – колова, осьова і радіальна складові вектору абсолютної швидкості вихрового потоку; r_1 – радіус вихрової камери; r_0 – радіус перерізу пасивного потоку; r_b – радіус вихрового шнура.

У розрахунковій схемі також враховується наявність зворотних течій, що виникають у сильно закручених потоках, та утворення вихрового шнура – області квазітвердого обертання потоку у приосьовій зоні вихрової камери.

Математична модель робочого процесу РПСА вихрового типу базується на моделі течії закипаючої рідини у частині сопла активного потоку, що розширюється, рідинно-парового струминного компресора, запропонованій Марченком В. М. і Прокоповим М. Г., та моделі течії із тангенціальною швидкістю, що використовувалась у роботах Халатова А. А., Смульського І. І., Левеллена В. Б., Гольдштіка М. О., Грінспена Х. П. та ін., з урахуванням особливостей течії скипаючого потоку у полі відцентрових сил. В основу моделі робочого процесу РПСА вихрового типу покладені рівняння Нав'є-Стокса у циліндричних координатах, рівняння збереження маси, енергії, кількості руху, стану середовища і виробництва ентропії. Ці рівняння доповнюються рівняннями кінетики фазового переходу і статичного розподілу за розмірами крапель рідини, а також залежностями для розрахунку швидкості звуку у двофазному середовищі, геометрії каналу і дотичного напруження на стінці, які спільно з рівняннями обмежуючих поверхонь якісно описують розв'язання поставленої задачі.

Для досягнення високих показників ефективності моделювання робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу проводилось у складі струминного термокомпресорного (СТК) модуля (рис. 2).

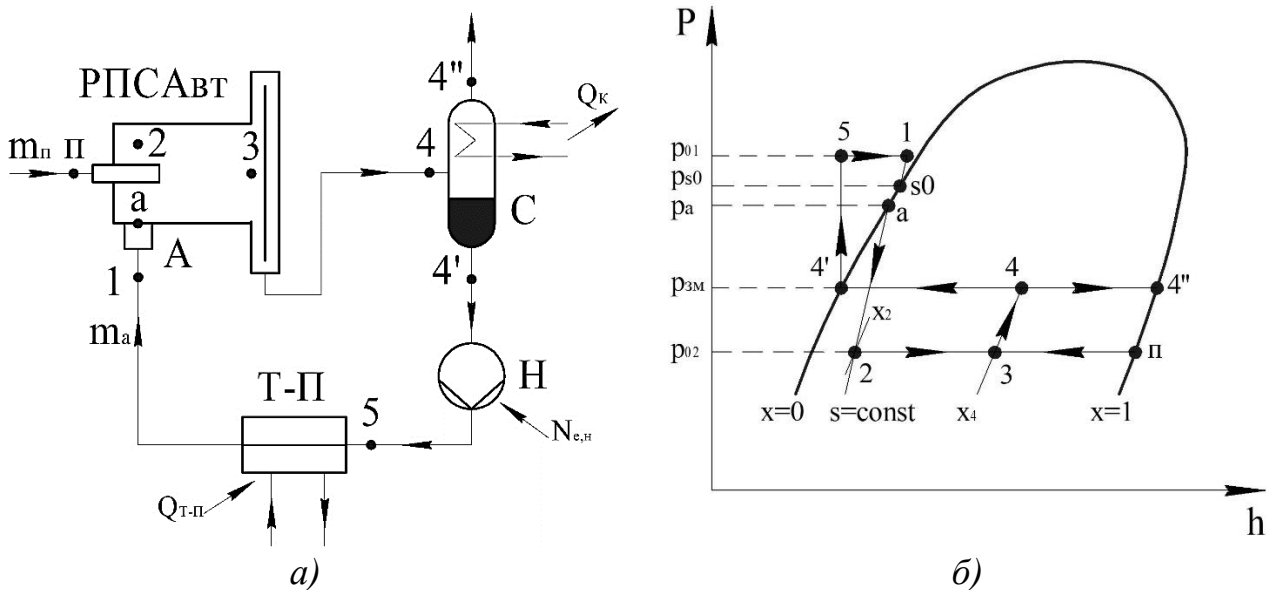


Рисунок 2 – Схеми РПСА вихрового типу у складі СТК-модуля (а) та процесів, що відбуваються у ньому (б): РПСАВТ – рідинно-паровий струминний апарат вихрового типу; С – сепаратор; Н – насос; Т-П – теплообмінник-підігрівач; А – сопло активного потоку.

Робочий процес РПСА вихрового типу полягає у наступному. Недогріта до насичення у теплообміннику-підігрівачі рециркуляційна рідина (процес 5-1), що відкачується насосом із сепаратора (4'-5), подається у сопло активного потоку. У процесі витікання через сопло (1-s0) температура середовища цього потоку

практично не змінюється і дорівнює температурі недогрітої до насичення рідини при тиску стиснення p_{01} . Далі потік долає ділянку метастабільності ($s0-a$), що затримує початок скипання рідини. За рахунок того, що рідина виявляється метастабільно перегрітою, це призводить до її інтенсивного скипання ($a-2$) і формування струменя робочого потоку з високим об'ємним паровмістом. При цьому тиск за ділянкою метастабільності p_a виявляється меншим від тиску у витратному перерізі p_{s0} . За рахунок тангенціальної закрутки потоку у перерізі $I-I$ вихрової камери утворюється робочий вихровий потік парорідинної суміші, параметри якого розподіляються за радіусом вихрової камери, причому вздовж осі вихрової камери утворюється зона зниженого тиску, за рахунок чого відбувається інжектування пари пасивного потоку. Змішування інжектваного пасивного ($n-3$) і активного ($2-3$) середовищ здійснюється у створеному робочому вихровому потоці. Стиснення змішаного потоку на виході з вихрової камери ($3-4$) відбувається у дифузорі, після чого стиснута парорідинна суміш надходить до сепаратора, де розділяється на рідку ($4-4'$) і парову ($4-4''$) фази. Відсепарована рідина відкачується насосом, а положення точки I обумовлюється вибором тиску p_{01} , що розвиває насос, та рівнем підігріву рідини після насоса $\Delta T = T_1 - T_5$.

Згідно із прийнятою розрахунковою схемою РПСА вихрового типу моделювання структури течії потоку у меридіональній площині початкового перерізу $I-I$ вихрової камери РПСА має наступний вигляд (рис. 3).

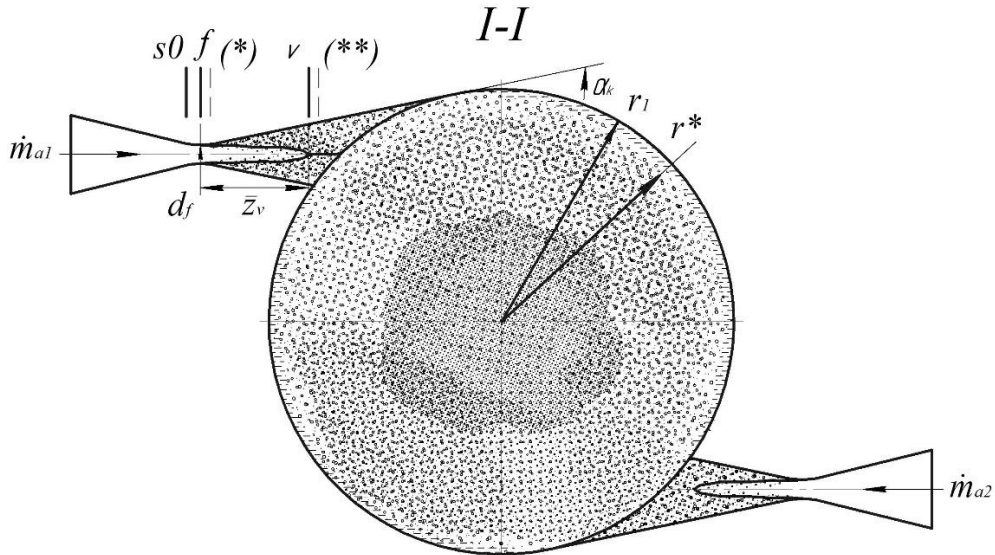


Рисунок 3 – Схема структурних перетворень скипаючої рідини у вхідному перерізі $I-I$ вихрової камери: $s0$ – переріз, у якому встановлюється тиск насичення p_{s0} при температурі рідини t_0 ; f – витратний переріз; v – переріз структурного перетворення; (*) – перший критичний переріз; (**) – другий критичний переріз; \dot{m}_{a1} , \dot{m}_{a2} – масові витрати рідини активного потоку; d_f – діаметр витратного перерізу; \bar{z}_v – поздовжня координата; α_k – кут конусності сопла; r_1 – радіус вихрової камери; r^* – радіус початку пристінного бульбашкового кипіння у вихровому потоці.

Схема течії скипаючої рідини на ділянці сопла активного потоку ($s0 - v$) відповідає схемі течії у РПСА прямоосного типу, тому у профільованому каналі підведення активного потоку при вході до вихрової камери у недогрітій до насичення рідині встановлюється тиск насичення p_{s0} , що відповідає початковій температурі рідини t_0 . Для бульбашкового середовища характерні низькі значення швидкості звуку, тому на невеликій відстані від витратного перерізу (f) потік переходить через перший критичний переріз (*), який визначає кінцеву величину метастабільного перегріву рідини. Однак у РПСА вихрового типу сопло активного потоку має форму недорозширеного сопла Лавалю, за рахунок чого коли рідина у перерізі (f) виявляється метастабільно перегрітою, пристінне скипання рідини буде зміщуватись углиб вихрової камери і відбуватись вже у кільцевому перерізі на деякому радіусі початку пристінного бульбашкового кипіння r^* . Наявність ділянки між кільцевими перерізами r_1 і r^* обумовлено запізненням утворення активних центрів в умовах прискореної течії при великих радіальних градієнтах тиску і швидкості.

У початковому перерізі вихрової камери $I-I$ на ділянці бульбашкового кипіння потік має у меридіональній площині кільцеву будову: у периферійній області рухається метастабільно перегріта рідина, а у приосьовій – бульбашкове двофазне середовище дрібнодисперсної структури. Інтенсивна генерація парових бульбашок у полі відцентрових сил у перерізі $I-I$ супроводжується їх збільшенням в об'ємі і переміщенням вздовж осі вихрової камери. Через нерівномірність розподілу паровмісту за осьовим перерізом вихрової камери $I-I$ буде спостерігатись нестабільна область бульбашкової структури, яка зберігається до перерізу сталої течії $II-II$. У перерізі $II-II$ завершується інверсія структури потоку, забезпечується перехід до парокрапельної течії і відбувається залишкове дроблення великих крапель рідини, а за перерізом $II-II$ остаточно формується робочий вихровий потік парокрапельної структури.

Для циліндричної вихрової камери за припущення, що шари у радіальному напрямку не переміщуються $c_r = 0$, параметри вихрового потоку скипаючої рідини у вхідному перерізі вихрової камери $I-I$ описуються системою рівнянь Ейлера для стаціонарної течії у циліндричних координатах, рівнянням нерозривності у циліндричних координатах з урахуванням стисливості потоку, рівнянням вільного вихору з урахуванням степеневого закону та рівнянням для модифікованого критерія Ейлера:

$$\begin{cases} \frac{c_u^2}{r} = v \cdot \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \frac{c_u}{r} \cdot \frac{\partial c_u}{\partial u} + c_z \cdot \frac{\partial c_u}{\partial z} = -v \cdot \frac{\partial p}{r \partial u}, \\ \frac{c_u}{r} \cdot \frac{\partial c_z}{\partial u} + c_z \cdot \frac{\partial c_z}{\partial z} = -v \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{c_u}{v} \right)}{r \partial u} + \frac{\partial \left(\frac{c_z}{v} \right)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$c_u \cdot r^n = const, \quad (3)$$

$$Eu_* = \frac{2v_a}{c_a^2} \cdot \Delta p_{\text{мст}}, \quad (4)$$

де c_u, c_z – колова та осьова складові вектору абсолютної швидкості вихрового потоку, m/c ; r, u, z – радіальна, колова та осьова координати, $m, рад, m$; v – питомий об'єм вихрового потоку, m^3/kg ; p – тиск у вихровому потоці, $Па$; n – безрозмірний параметр, що залежить від геометричних і режимних параметрів вихрового потоку; Eu_* – безрозмірний модифікований критерій Ейлера; $\Delta p_{\text{мст}}$ – необхідне падіння тиску у потоці для подолання стану метастабільності рідини, $Па$; індекс «а» – параметр у вихідному перерізі сопла.

Рівняння (1)-(4) дозволяють отримати залежність для знаходження радіусу початку пристінного бульбашкового кипіння у вихровому потоці для будь-якого параметра n :

$$\bar{r}^* = (1 + n \cdot Eu_*)^{-\frac{1}{2n}}. \quad (5)$$

Таким чином, отриманий у безрозмірному вигляді параметр \bar{r}^* є радіальним параметром критичного перерізу $I-I$ РПСА вихрового типу, що визначає процес початку скипання рідини у вихровій камері, який залежить від відношення пануючих у вихровому потоці сил тиску та інерції, фізичних властивостей потоку та величини параметра n (рис. 4).

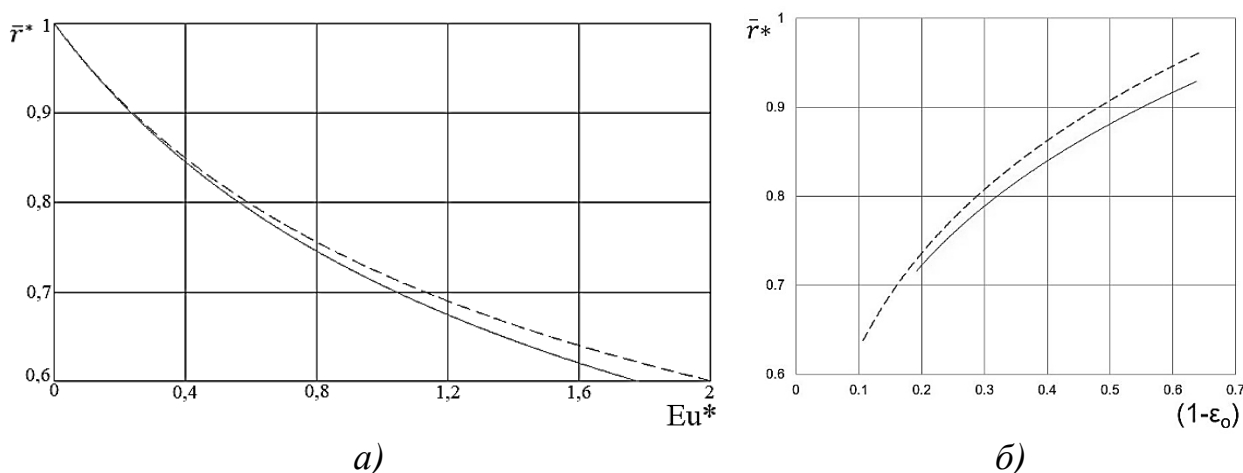


Рисунок 4 – Розрахункові залежності радіусу початку пристінного бульбашкового кипіння у вихровому потоці від модифікованого критерія Ейлера (а) та відносного початкового недогрівання рідини (б):

— — $n = 1$, - - - - $n = 1,2$

Моделювання течії скипаючої рідини у соплі активного потоку РПСА вихрового типу дозволило виявити конструктивну особливість апарата у вигляді косою зрізу у вихідній частини сопла активного потоку, який є причиною відхилення потоку від осі сопла, за рахунок чого порушується плавність закрутки і симетричність вихрового потоку у початковому перерізі $I-I$ вихрової камери (рис. 5).

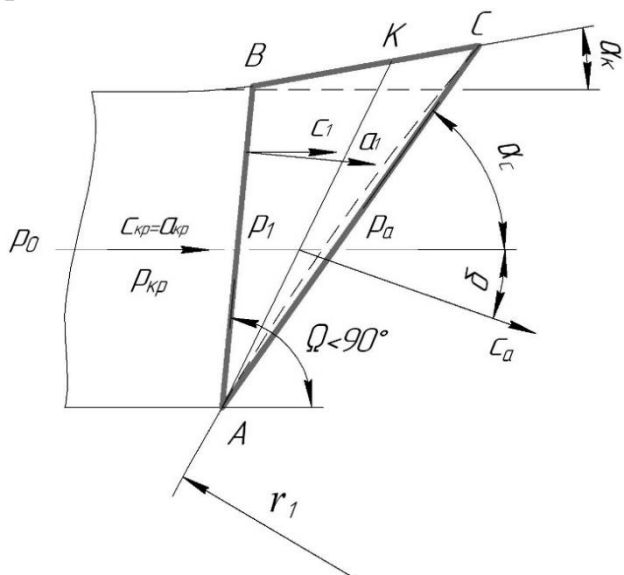


Рисунок 5 – Відхилення потоку у косому зрізі сопла, що розширюється, РПСА вихрового типу

Ділянка витратного перерізу сопла (f), що відповідає початковій характеристиці розповсюдження хвиль $A-B$, визначає мінімально допустимий випадок існування косою зрізу. Якщо тиск середовища за косим зрізом p_a менший від тиску перед косим зрізом p_1 , то у цьому випадку кромка сопла A є джерелом безперервних збурень потоку, у результаті яких виникають стаціонарні хвилі розрідження, оскільки у цій точці тиск різко падає від p_1 у вихідному перерізі сопла $A-B$ до тиску середовища p_a . За цієї причини порушується симетричність спектру витікання та у межах кута ABK відбувається відхилення потоку від осі

сопла на кут δ , що відповідає розширенню потоку від тиску p_1 до p_a , а швидкість його зростає від c_1 до c_a . Розширювальна здатність косою зрізу обмежується таким тиском $p_{a \min}$, при якому кінцева характеристика хвилі $A-K$ збігається із перерізом косою зрізу сопла $A-C$.

Для визначення кута відхилення потоку δ у РПСА вихрового типу використовується рівняння нерозривності, яке враховує наявність кута конусності сопла α_k , що було зроблено вперше:

$$\frac{c_{кр} \cdot \sin \Omega \cdot AC \cdot \sin(\alpha_c - \alpha_k)}{v_{кр} \cdot \sin(\Omega - \alpha_k)} = \frac{c_a \cdot AC \cdot \sin(\alpha_c + \delta)}{v_a}; \quad (6)$$

$$\delta = \arcsin \left(\frac{\sin \Omega}{\sin(\Omega - \alpha_k)} \cdot \left(\frac{c_{кр}}{c_a} \cdot \left(\frac{p_{кр}}{p_{a \min}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_k - \sqrt{1 - \left(\frac{c_{кр}}{c_a} \cdot \left(\frac{p_{кр}}{p_{a \min}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sin \alpha_c \right)^2} \cdot \sin \alpha_k \right) \right) - \alpha_c, \quad (7)$$

де c – середня швидкість потоку, m/s ; p – тиск потоку, Pa ; Ω – кут Маха, $град$; α_c – кут косою зрізу сопла, $град$; α_k – кут конусності сопла, $град$; v – питомий

об'єм потоку, m^3/kg ; k – показник адиабати потоку; індекс «кр» – параметр у критичному перерізі сопла; індекс «а» – параметр у вихідному перерізі сопла.

Таким чином, отримане рівняння (7) враховує кут конусності сопла α_k , який чинить додатковий вплив на кут відхилення потоку δ у рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу, який залежить від кута косої зрізу сопла α_c , кута конусності сопла α_k , гранично досяжного розширення потоку у косому зрізі сопла $p_{кр}/p_{a\ min}$, а також від фізичних властивостей потоку. Розрахункові залежності кута відхилення потоку δ на основі рівняння (7) показані на рис. 6.

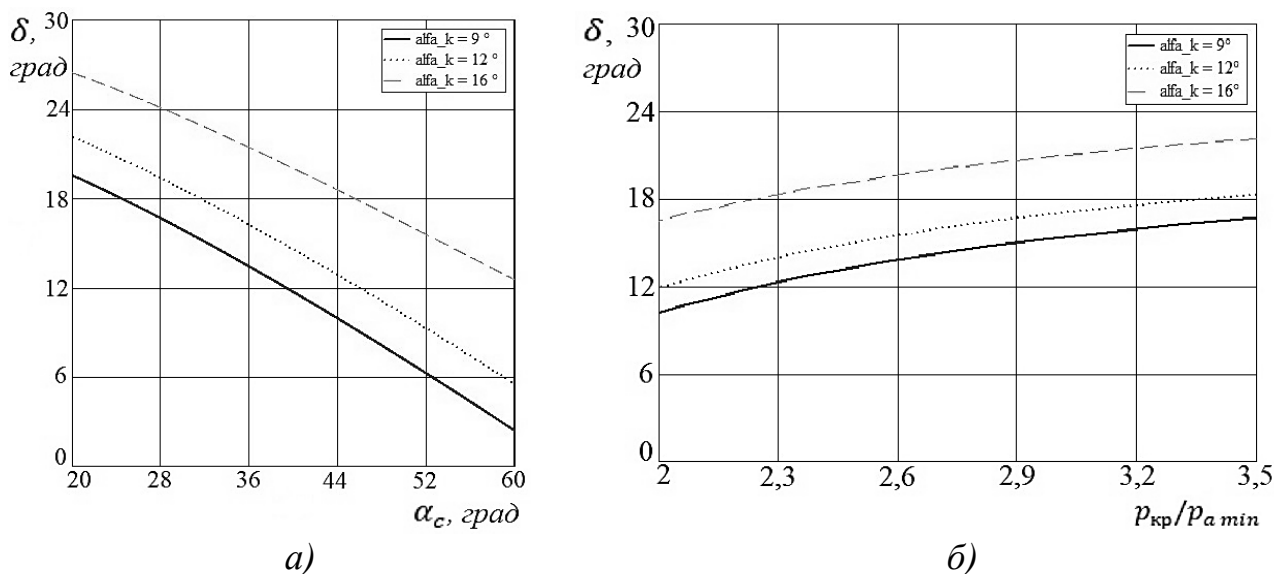


Рисунок 6 – Розрахункові залежності кута відхилення потоку δ від кута косої зрізу сопла α_c (а) та гранично досяжного розширення потоку у косому зрізі сопла $p_{кр}/p_{a\ min}$ (б):

— — $\alpha_k = 9^\circ$, — $\alpha_k = 12^\circ$, - - - - - $\alpha_k = 16^\circ$

При розв'язанні математичної моделі робочого процесу РПСА вихрового типу отримано рівняння спіральної траєкторії вихрового потоку:

$$u(r, z) = \frac{2}{3 \cdot r} \cdot \frac{c_u}{c_z} \cdot \sqrt{\frac{z^3}{l}} \quad (8)$$

і рівняння кроку спіральної траєкторії вздовж вихрової камери:

$$\Delta l = 3\pi r \cdot \frac{c_z}{c_u} \cdot \sqrt{\frac{l}{z}}, \quad (9)$$

де l – довжина ділянки сталої течії вихрового потоку, м.

Рівняння (9) дозволило зробити наступні висновки: 1) крок спіральної траєкторії вихрового потоку у напрямку від осі вихрової камери до периферії збільшується; 2) крок спіральної траєкторії вихрового потоку за довжиною вихрової камери зменшується.

Параметром, що визначає інтенсивність теплообміну скипаючого потоку у полі відцентрових сил використовувався критерій Якоба, що характеризує відношення між тепловим потоком, що йде на перегрівання одиниці об'єму рідини, та об'ємною теплотою пароутворення:

$$Ja = \frac{c'_p \cdot \Delta t \cdot v''}{r_s \cdot v'}, \quad (10)$$

де c'_p – теплоємність рідини при постійному тиску, Дж/(кг·К); r_s – теплота пароутворення рідини, Дж/кг; Δt – різниця температур рідини навколо бульбашки та пари всередині бульбашки, К; v' – питомий об'єм рідини, м³/кг; v'' – питомий об'єм пари, м³/кг.

Низькі розрахункові значення динамічної швидкості зросту парових бульбашок $\dot{R} \approx 10^{-3}$ м/с і часу зростання парового пухирця $\tau \approx 10^{-5}$ с та малі величини відривного діаметра парового пухирця $d_0 \approx 10^{-5}$ м зумовлюють достатньо високу частоту відриву парових бульбашок $f_0 \approx 10^5$ с⁻¹ від стінки вихрової камери РПСА вихрового типу, завдяки чому необхідна незначна довжина ділянки закипання I-II, за яким забезпечується швидкий перехід до дрібнодисперсної структури потоку.

Проведений ексергетичний аналіз енергоефективності РПСА вихрового типу за методикою Дж. Тсатсароніса показав, що на підставі експериментальних даних за термічними і режимними параметрами взаємодіючих потоків можливе підвищення ефективності як окремих компонентів рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, так і установки в цілому.

У **третьому розділі** поданий опис експериментальної установки для дослідження РПСА вихрового типу, приладу для вимірювання тиску і напрямку потоку у вихровій камері РПСА; наведена методика проведення експериментальних досліджень; виконано оцінювання похибок прямих і непрямих вимірювань.

Перед проведенням основних випробувань були виконані налагоджувальні випробування для врахування нерівномірностей розподілу потоку у вхідному перерізі I-I вихрової камери, а також для підтвердження вісесиметричності течії. Результати експериментальних досліджень показали, що при використанні лише одного сопла активного потоку спостерігається нерівномірний розподіл рідинної і парової фаз, що підтверджується візуалізаційною фіксацією та вимірюванням полів тисків по колу вихрової камери трьохканальним циліндричним зондом у характерних перерізах вихрової камери.

Приймальна частина зонда складається із трьох каналів, що розміщені у одній горизонтальній площині циліндричної частини вимірювальної насадки зонда. Бічні канали необхідні для визначення напрямку вектору швидкості вихрового потоку, центральний канал – для вимірювання поля тиску. Як реєструючий прилад для бічних каналів використовувався багатощкалевий U-подібний манометр, заповнений дистильованою водою. Діаметр вимірювальної насадки зонда становить 2,5 мм, діаметр приймальних отворів

0,3 мм, бічні отвори, розташовані під кутом 15° відносно центрального отвору. Нечутливість цього зонда до кута скошу потоку β при вимірюванні повних тисків становить $\pm 15^\circ$, до кута скошу потоку δ – $\pm 3^\circ$. Для переміщення і фіксації положення циліндричного зонда використовувався координатник із безпосереднім ручним приводом. Координатник забезпечений також гідорівнем із змінним лімбом та ціною поділу 1° .

У четвертому розділі викладені результати експериментальних досліджень робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, результати числового та розрахункового моделювання взаємодії активного і пасивного потоків у проточних частинах РПСА, а також надані практичні рекомендації до проектування РПСА вихрового типу за результатами експериментальних досліджень.

Результати числового моделювання у програмному комплексі Ansys CFX підтвердили теплофізичну і математичну моделі витікання скипаючого потоку із сопла з косим зрізом. Візуалізація процесів підтверджує відхилення потоку у косому зрізі сопла у достатньо великому діапазоні кутів косоного зрізу $\alpha_c = 20 - 60^\circ$ та кутів конусності сопла $\alpha_k = 9; 12; 16^\circ$, при діаметрах критичного перерізу сопла $d_r = 2,3$ мм і $d_r = 4,1$ мм та початкових тисках перед соплом $p_{01} = 5 - 20$ бар.

Аналіз результатів числового моделювання показує (рис. 7), що початок скипання рідини у витратному перерізі (f) сопла, що розширюється, і перехід через перший критичний переріз (*) відбувається у межах косоного зрізу при $\alpha_c = 20 - 45^\circ$. При куті косоного зрізу $\alpha_c > 45^\circ$ початок скипання рідини відбувається на межі вихідного перерізу косоного зрізу. Відповідно, ділянка метастабільності рідини, що затримує початок скипання, буде зміщуватись углиб вихрової камери, за рахунок чого буде збільшуватись час релаксаційного пароутворення у вихровому потоці. В усіх випадках за межею косоного зрізу у центральній частині потоку знаходиться ядро рідини, на периферії потоку – парорідинна суміш із залишковим вмістом рідини 1 – 2%. Вимірювання кута відхилення потоку за результатами розрахунку показало, що при початковому тиску перед соплом $p_{01} = 5 - 20$ бар і куті конусності сопла $\alpha_k = 16^\circ$ потік відхиляється від осі сопла у діапазоні кутів $\delta = 12 - 27^\circ$. При цьому, чим менший кут косоного зрізу α_c , тим більший кут відхилення потоку δ .

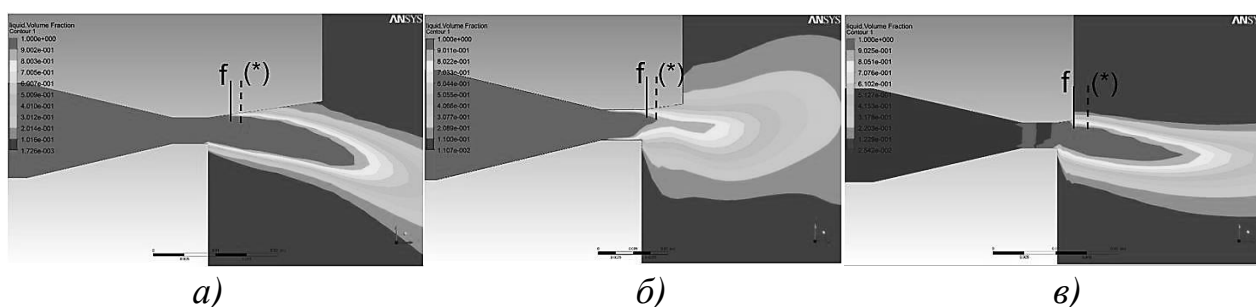


Рисунок 7 – Розподіл об’ємного паровмісту у соплі активного потоку РПСА вихрового типу з кутами косоного зрізу ($p_{01} = 5$ бар, $\alpha_k = 16^\circ$):
 а) $\alpha_c = 20^\circ$; б) $\alpha_c = 40^\circ$; в) $\alpha_c = 60^\circ$

Аналіз результатів експериментальних досліджень течії скипаючого потоку у соплі, що розширюється, з косим зрізом показує, що скипання потоку у соплі з діаметром критичного перерізу $d_r = 2,3$ мм відбувається менш інтенсивно, ніж у соплі з $d_r = 4,1$ мм за однакових початкових тисків p_{01} і конструктивних параметрів (рис. 8 а, б). При початкових тисках $p_{01} = 10 - 20$ бар для сопла з $d_r = 2,3$ мм та $p_{01} \geq 20$ бар для сопла з $d_r = 4,1$ мм на виході з косою зрізу сопла відбувається явище запирання потоку і формування бочкоподібного струменя (рис. 8 в). Візуалізація течії скипаючого потоку у характерних перерізах вихрової камери РПСА представлена на рис. 9.

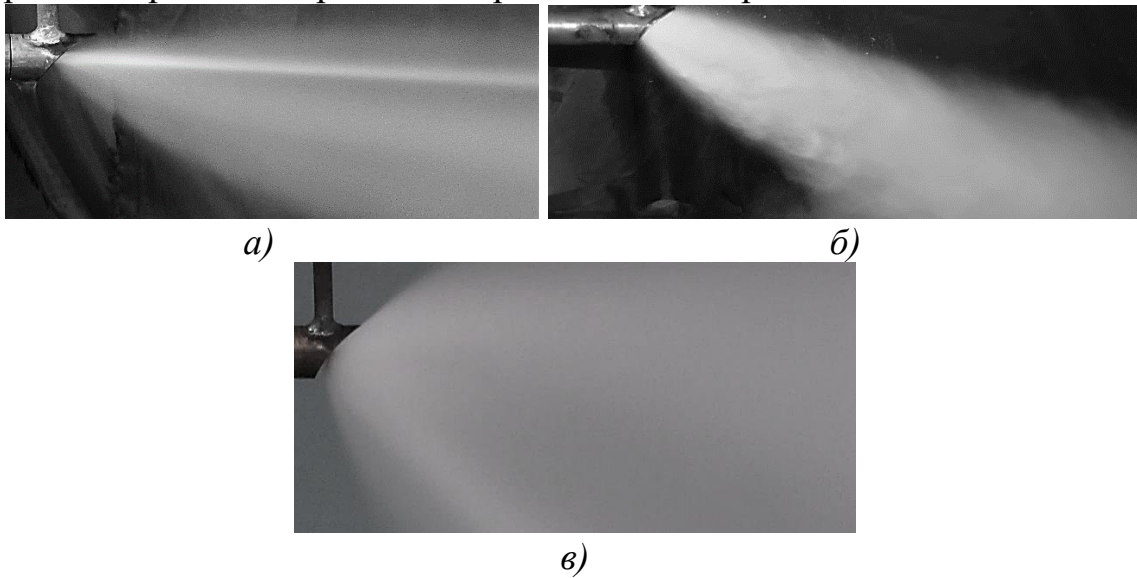


Рисунок 8 – Фотографії струменів скипаючого потоку при витіканні із сопла, що розширюється, з косим зрізом за наступних параметрів:

- а) $d_r = 2,3$ мм, $\alpha_c = 40^\circ$, $\alpha_k = 16^\circ$, $p_{01} = 5$ бар;
- б) $d_r = 4,1$ мм, $\alpha_c = 40^\circ$, $\alpha_k = 16^\circ$, $p_{01} = 5$ бар;
- в) $d_r = 2,3$ мм, $\alpha_c = 40^\circ$, $\alpha_k = 16^\circ$, $p_{01} = 10$ бар.

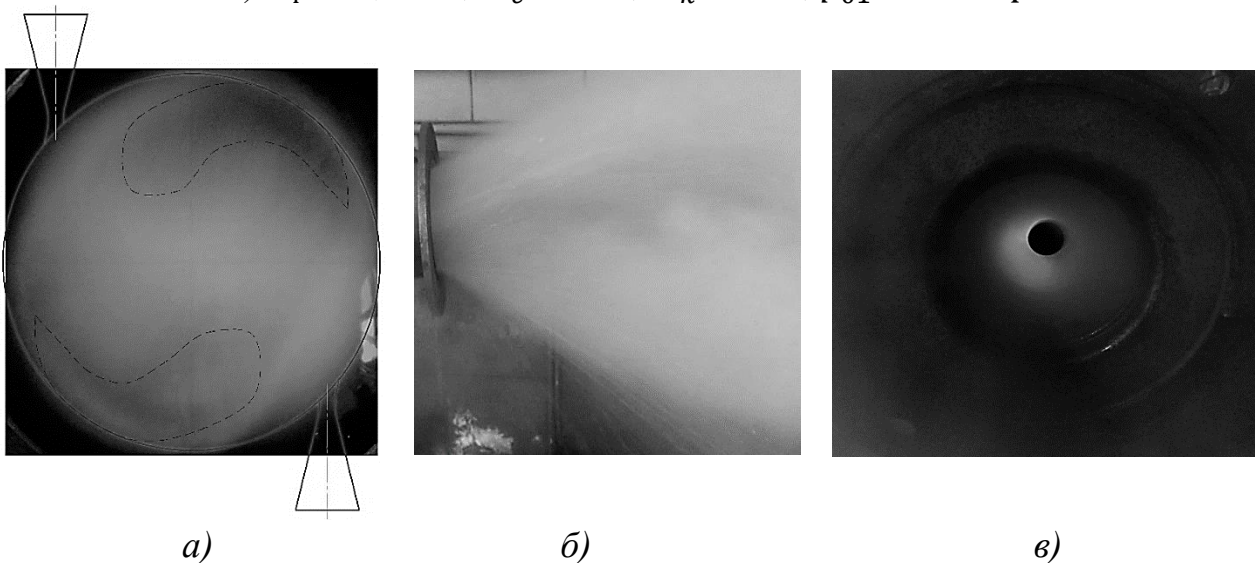


Рисунок 9 – Фотографії структури потоку у вихровій камері РПСА ($p_{01} = 10$ бар, $L/D = 1$):

- а) у вхідному перерізі I-I; б) у вихідному перерізі III-III;
- в) вздовж осі вихрової камери.

Візуалізація течії у вхідному перерізі вихрової камери *I-I* підтвердила нерівномірність розподілу структури потоку за рахунок відхилення у косому зрізі сопла, тому на фотографії (рис. 9 *а*) спостерігаються зони нерівномірного розподілу рідкої та парової фаз по колу вихрової камери. Використання двох сопел активного потоку у РПСА вихрового типу підтверджує вісесиметричність потоку у вихідному перерізі *III-III* вихрової камери як візуалізацією (рис. 9 *б*), так і вимірюванням повних тисків p_{03} по колу вихрової камери, на відміну від використання лише одного соплового підводу. Вздовж осі вихрової камери спостерігається зона інжекції (рис. 9 *в*), яка знаходиться у межах відносного радіусу $\bar{r} = 0,4 - 0,5$, що підтверджується вимірюваннями повного тиску і досяжними показниками глибини розрідження (рис. 10 *а, б*) у характерному перерізі вихрової камери *II-II*. Дослідження РПСА вихрового типу виявило наявність ефекту Ранка-Хілша у потоці скипаючої рідини у полі відцентрових сил. Експериментальна залежність повної температури на осі вихрової камери T_{02} від початкового тиску p_{01} перед соплом активного потоку подана на рис. 10 *в*.

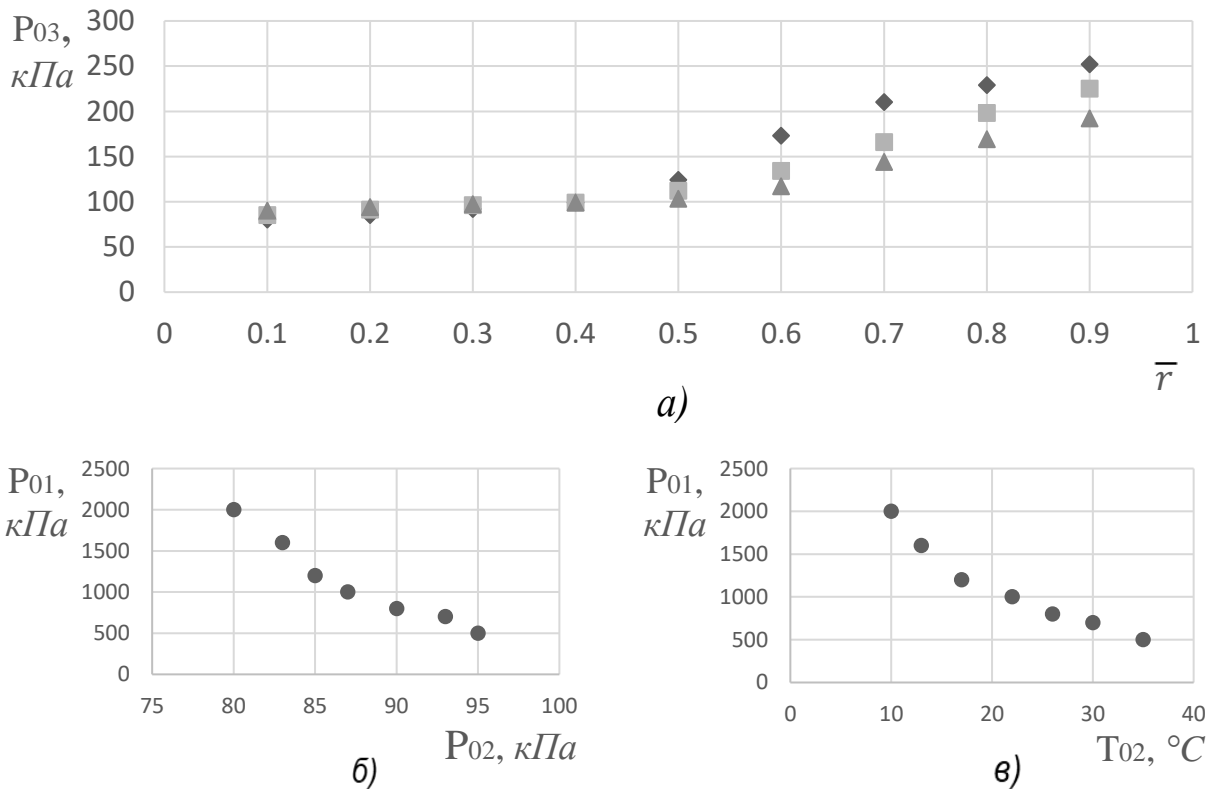


Рисунок 10 – Результати експериментального дослідження РПСА вихрового типу: *а*) повного тиску у вихровій камері: \blacklozenge - \blacklozenge - \blacklozenge – $p_{01} = 2$ МПа, \blacksquare - \blacksquare - \blacksquare – $p_{01} = 1,2$ МПа, \blacktriangle - \blacktriangle - \blacktriangle – $p_{01} = 0,5$ МПа; *б*) досяжних показників глибини розрідження p_{02} на осі вихрової камери; *в*) повних температур T_{02} на осі вихрової камери.

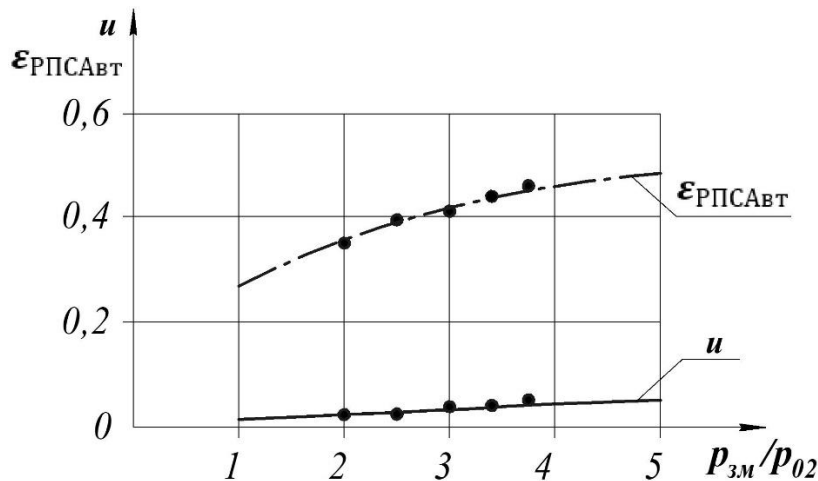


Рисунок 11 – Ексергетична ефективність РПСА вихрового типу

За результатами експериментальних досліджень робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу отримано залежність досяжних показників ексергетичної ефективності $\epsilon_{\text{РПСАВТ}}$ та коефіцієнту інжекції u від відношення тисків $p_{\text{зм}}/p_{02}$ (рис. 11).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане науково-практичне завдання, що полягає у визначенні закономірностей впливу термічних і геометричних параметрів на ефективність робочого процесу РПСА вихрового типу, що дозволило розширити функціональні можливості рідинно-парових струминних апаратів.

За результатами виконання дисертаційної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Створена теплофізична модель течії скипаючої рідини у вихровому потоці, що включає основні внутрішні характеристики процесу кипіння рідини та враховує особливості процесу теплообміну у інтенсивних полях відцентрових сил. Адекватність моделі підтверджується результатами експериментальних і числових досліджень.

2. Уточнена математична модель процесу релаксаційного пароутворення у вихровому потоці, що враховує радіальний градієнт тиску потоку, наявність косою зрізу сопла при вході до вихрової камери, кільцеву область квазітвердого обертання потоку, зону зворотних течій та спіральність траєкторії вихрового потоку.

3. Експериментальним шляхом встановлені закономірності впливу початкових термічних і геометричних параметрів на ефективність процесу пароутворення у вихровому потоці:

а) візуальне дослідження скипаючого потоку у каналі робочого сопла РПСА вихрового типу показало, що струмінь відхиляється від осі сопла на кут δ , який не враховувався раніше при проектуванні вихрових апаратів;

б) встановлено, що при відхиленні потоку у косому зрізі сопла відбувається його удар об стінку вихрової камери, за рахунок чого створюється зона

нерівномірного розподілу параметрів вихрового потоку, що впливає на поздовжні розміри вихрової камери;

в) використання кута косоного зрізу сопла у діапазоні $\alpha_c = 35 - 45^\circ$ забезпечує одночасно плавність закрутки потоку та його перехід через перший критичний переріз, що характеризує закінчення ділянки метастабільності рідини, у межах косоного зрізу;

г) діапазон робочих початкових тисків у РПСА вихрового типу при використанні сопла з діаметром горла $d_r = 2,3$ мм знаходиться у межах $p_{01} = 5 - 10$ бар; для сопла $d_r = 4,1$ мм становить $p_{01} = 5 - 20$ бар;

4. За результатами експериментальних досліджень розроблена методика розрахунку геометричних параметрів РПСА вихрового типу та надані відповідні рекомендації до його проектування.

5. Отримані експериментальні характеристики РПСА вихрового типу:

а) зона інжекції пасивного потоку знаходиться у межах відносного радіусу від $\bar{r} = 0$ до $\bar{r} = 0,4$ і не змінюється у діапазоні початкових тисків перед соплом $p_{01} = 5 - 20$ бар;

б) радіальний градієнт тиску потоку у вихровій камері при $p_{01} = 5 - 20$ бар знаходиться у межах $p_{03}/p_{02} = 2,13 - 3,15$ (більші значення початкового тиску перед соплом активного потоку p_{01} відповідають більшим відношенням тисків p_{03}/p_{02});

в) мінімальна температура вихрового потоку на осі вихрової камери досягає $T_{02} = 10$ °С, що відповідає початковому тиску перед соплом активного потоку $p_{01} = 20$ бар;

г) максимальна досяжна глибина розрідження на осі вихрової камери дорівнює $p_{02} = 80$ кПа, що відповідає початковому тиску перед соплом активного потоку $p_{01} = 2$ МПа і діаметру критичного перерізу сопла $d_r = 4,1$ мм;

д) діапазон параметрів робочих середовищ активного і пасивного потоків ($p_{зм}/p_{02} = 2 - 3,75$) забезпечує максимальну ефективність РПСА вихрового типу ($u = 0,01 - 0,06$, $\varepsilon_{РПСАвт} = 0,35 - 0,45$).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Мерзляков Ю. С. Гибридный термотрансформатор со струйной термокомпрессией водоаммиачного рабочего тела / В. М. Арсеньев, М. И. Проценко, Ю. С. Мерзляков // Холодильная техника і технологія. – 2010. – № 5 (127). – С. 26 – 29.

2. Мерзляков Ю. С. Расчет удельной стоимости теплоты для систем горячего водоснабжения с применением бивалентной теплонасосной технологии / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 1 (23). – С. 24 – 27.

3. Мерзляков Ю. С. К вопросу моделирования структурных преобразований потока в жидкостно-паровом струйном компрессоре вихрового типа /

В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Холодильна техніка і технологія. – 2011. – № 5 (133). – С. 11 – 14.

4. Мерзляков Ю. С. Струйная термотрансформаторная установка для систем теплоснабжения / В. М. Арсеньев, С. М. Ванеев, М. Г. Прокопов, М. И. Проценко, Ю. С. Мерзляков // Наукові праці ДНТУ. Серія : «Гірничо-електромеханічна»: наукове видання. – 2011. – № 22 (195). – С. 24 – 31.

5. Merzliakov I. Jet thermal compression of the ammonia-water mixture for heat pumps and refrigerating systems / V. Arsenyev, V. Kozin, I. Merzliakov, M. Protsenko // Applied mechanics and materials. – 2014. – Vol. 630. – P. 61 – 65.

6. Мерзляков Ю. С. Влияние косо́го среза сопла на формирование вихревого потока в жидкостно-паровом струйном компрессоре вихревого типа / М. Г. Прокопов, В. Н. Козин, Ю. С. Мерзляков, О. Ю. Чех // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 4 (42). – С.20 – 24.

7. Мерзляков Ю. С. Экспериментальные исследования жидкостно-парового струйного компрессора вихревого типа / Ю. С. Мерзляков // Сталий розвиток і штучний холод / Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон, 2012. – С. 374 – 376.

8. Патент України № 89834, МПК F04F 5/24. Спосіб стиснення парорідинного середовища / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков. – Надрук. 25.04.2014, Бюл. № 8.

9. Мерзляков Ю. С. К вопросу моделирования структурных преобразований потока в жидкостно-паровом струйном компрессоре вихревого типа / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології / Збірник тез докладів Міжнародної НТК. – Одеса: ОДАХ, 2011. – С. 8 – 9.

10. Мерзляков Ю. С. Адиабатное течение самоиспаряющейся жидкости в вихревом потоке / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Сучасні технології в промисловому виробництві / Матеріали Всеукраїнської міжвузівської НТК. – Суми : Вид-во СумДУ, 2011. – Ч. III. – С. 18.

11. Мерзляков Ю. С. Создание экспериментального образца термотрансформатора со струйной термокомпрессией / М. И. Проценко, Ю. С. Мерзляков // Сучасні технології в промисловому виробництві / Матеріали Всеукраїнської міжвузівської НТК. – Суми : Вид-во СумДУ, 2012. – Ч. III. – С. 104.

12. Мерзляков Ю. С. Создание экспериментального образца жидкостно-парового струйного компрессора вихревого типа / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Промислова гідравліка і пневматика / Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП. – Чернігів : Вид-во Вінниця : ГЛОБУС-ПРЕС, 2012. – С. 55.

13. Мерзляков Ю. С. Загальні засади вибору вакуумного агрегату системи вакуумного охолодження / С. С. Мелейчук, Ю. С. Мерзляков // Сучасні проблеми розвитку легкої і харчової промисловості / Тези наукових доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції наукової молоді і студентів. – Луганськ, 2013. – С. 87 – 88.

14. Мерзляков Ю. С. Влияние косо́го среза сопла на формирование вихревого потока в жидкостно-паровом струйном компрессоре вихревого типа / М. Г. Прокопов, Ю. С. Мерзляков // Промислова гідравліка і пневматика /

Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП. – Мелітополь : Вид-во Вінниця : ГЛОБУС-ПРЕС, 2014. – С. 109.

15. Мерзляков Ю. С. К вопросу экспериментального исследования вихревых потоков / В. М. Арсеньев, Ю. С. Мерзляков // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології / Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса : ОНАХТ, 2015. – С. 153 – 154.

АНОТАЦІЯ

Мерзляков Ю. С. Робочий процес рідинно-парового струминного апарата вихрового типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2018.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню робочого процесу рідинно-парового струминного апарата (РПСА) вихрового типу, який працює за принципом струминної термокомпресії. Досліджений вплив початкових термічних і витратних параметрів та характеристик активного і пасивного потоків на ефективність процесу пароутворення у полі відцентрових сил. Це дозволило визначити зону режимних параметрів, що відповідають максимальним значенням коефіцієнта інжекції.

Математичне моделювання взаємодії скипаючої у вихровому потоці рідини та інжектваної пари здійснювалось за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. В його основу закладені методи числового розв'язання рівнянь гідродинаміки, моделювання та візуалізації тривимірних течій рідин та газів у технічних об'єктах, що забезпечує обґрунтованість використання отриманих результатів.

В основу моделі робочого процесу РПСА вихрового типу покладені рівняння Нав'є-Стокса у циліндричних координатах, рівняння збереження маси, енергії, кількості руху, стану середовища і виробництва ентропії. У розрахунковій моделі також враховується наявність зворотних течій, що виникають у сильно закручених потоках, та утворення вихрового шнура – області квазітвердого обертання потоку у приосьовій зоні вихрової камери.

Експериментальним шляхом встановлені закономірності впливу початкових термічних і геометричних параметрів на ефективність процесу пароутворення у вихровому потоці. Це дало змогу підтвердити запропоновану модель робочого процесу рідинно-парового струминного апарата вихрового типу та створити його інженерну методичку розрахунку.

Ексергетичний аналіз енергоефективності робочого процесу РПСА вихрового типу за методикою Дж. Тсатсароніса показав, що його застосування дає змогу підвищити ефективність процесу вакуумування у широкому діапазоні робочих параметрів. Крім того, можливим є підвищення ефективності як окремих компонентів рідинно-парового струминного апарата вихрового типу, так і всієї установки.

Ключові слова: рідинно-паровий струминний апарат, вихровий потік, струминна термокомпресія, косий зріз сопла, ексергетична ефективність.

ABSTRACT**Merzliakov I. S. The operating process of the vortex liquid-vapor jet unit. – The manuscript.**

The thesis for a Candidate of Science Degree in specialty 05.05.17 – Hydraulic Machines and Hydropneumatic Units. – Sumy State University, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2018.

The thesis is devoted to modeling of the operating process of the vortex liquid-vapor jet unit (LVJU) working on the stream thermocompression principle. The author researches the influence of initial thermodynamic and consumption parameters and characteristics of motive and suction flows on the vaporization process efficiency within the field of centrifugal forces. It allows to define the operating parameters area corresponding to the entrainment ratio maximum value.

ANSYS CFX software tool has been used for mathematical modeling interaction of water boiling within vortex flow with suction vapor. The software based on numerical computation of fluid dynamics equations, modeling and visualization of three-dimensional flows of fluids and gases in technical devices, which provides validity of the obtained results application.

The operating process model of the vortex liquid-vapor jet unit is based on Navier–Stokes equations in cylindrical coordinates, equations of conservation of mass, energy, momentum, state and entropy production. The calculation model also takes into account swirling back-flows arising in fast swirling motions and the presence of a vortex core – quasi-solid rotation zone in the axial area of vortex generation chamber.

Experimentally, it has been determined that initial thermodynamic and geometric parameters affect the vaporization process efficiency within vortex flow. This enabled the author to confirm the operating process of the proposed model of the vortex liquid-vapor jet unit and create an engineering calculation method for it.

Applying the exergetic analysis by J. Tsatsaronis method for operating process efficiency evaluation of the vortex liquid-vapor jet unit made it possible to enhance the vacuumization efficiency in a wide range of operating parameters. Moreover, there is an opportunity for improvement of separate vortex liquid-vapor jet unit parts as well as whole unit.

Keywords: liquid-vapor jet unit, vortex flow, stream thermocompression, oblique cut nozzle, exergy efficiency.

Підписано до друку 24.04.2018 р.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 478

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.