

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕЛЕЙЧУК Станіслав Станіславович

УДК 621.524:533.697.5

**РОБОЧИЙ ПРОЦЕС І ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРОВОЇ ЕЖЕКТОРНОЇ СТУПЕНІ
ВАКУУМНОГО АГРЕГАТУ**

05.05.15 – вакуумна та компресорна техніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми - 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті

Міністерства освіти і науки України.

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЯКУБА Олександр Родіонович,
Сумський національний аграрний університет,
професор кафедри технологічного обладнання;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
ПАРАФІЙНИК Володимир Петрович,
ВАТ “Сумське МНВО ім. М.В.Фрунзе”,
головний конструктор проекту.

Провідна установа - Одеська державна академія холоду

Захист відбудеться 13 червня 2007 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

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

Автореферат розісланий “10” травня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Савченко Є.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В наш час має місце інтенсивний розвиток підприємств у таких галузях народного господарства: харчовій промисловості (вакуумне охолодження рідини), металургійній промисловості (безмасляні засоби відкачування у вакуумних печах), енергетиці (відкачування неконденсованих газів з конденсаторів паротурбінних установок).

У харчовій промисловості заміна технології видалення рідинної фази шляхом її нагрівання і випаровування на більш низькотемпературні процеси в умовах вакууму, підвищує якість продукції. При цьому у виробника відпадає необхідність щодо придбання складних систем тепло- і парогенерації. У металургійній промисловості за останній час сформувалися нові вимоги до вакуумного обладнання. У першу чергу це стосується ступеня екологічної чистоти вакууму, що одержується. В енергетиці ставляться такі вимоги до систем вакуумного охолодження: висока надійність і безвідмовність, додержання необхідних технологічних режимів за продуктивністю та тиском всмоктування, простота експлуатації і керування. Найбільш повно вимогам, що ставляться до вакуумного обладнання у вищезазначених технологіях, відповідають рідинно-кільцеві вакуумні насоси (РКВН). Однією з основних проблем, що стоїть перед виробниками вакуумної техніки, є підвищення ефективності РКВН у зв'язку з тим, що одноступінчасті вакуумні насоси мають деякі істотні недоліки, а саме: відносно низьку енергоефективність через втрати потужності за рахунок обертання рідинного кільця; високий рівень залишкового тиску, що регламентується тиском насичених парів робочої рідини.

Проблема зменшення тиску всмоктування РКВН вирішується декількома способами, одним із яких є перехід на багатоступінчасте стиснення, у тому числі агрегування насоса повітряними ежекторними пристроями. Вакуумний агрегат з ежекторним пристроєм найбільш ефективний при використанні його в області всмоктування менше 10 кПа.

На даний час немає інформації про особливості роботи вихрового ежектора як передвключеної ступені вакуумного агрегату, недостатньо досліджені проблеми співзгодження характеристик компонентів вакуумного агрегату. Відсутні методики розрахунку вихрової ежекторної ступені, що працює як ступень вакуумного насосу.

Таким чином, дослідження робочого процесу, отримання характеристик і створення методики розрахунку вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату є актуальними і практично значущими.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Наукові розробки реалізовані при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи № 81.02.01.06-07 “Розробка малої бінарної паротурбінної установки для децентралізованого електро і тепlopостачання підприємств України” (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0106U001938).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є експериментальне і теоретичне виявлення впливу геометричних параметрів проточної частини вихрової ежекторної ступені (ВЕС) на витратні і енергетичні характеристики як самого ежектора, так і на характеристики вакуумного агрегату в цілому, створення методики розрахунку ежекторної ступені вакуумного агрегату.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- визначити особливості робочого процесу ВЕС, що працює як перед-включена ступінь вакуумного агрегату;
- розробити математичну модель руху робочого середовища у проточній частині ВЕС вакуумного агрегату;
- виконати експериментальні і теоретичні дослідження впливу геометричних параметрів проточної частини ВЕС на характеристики ежектора і РКВН;
- виконати математичне моделювання руху і взаємодії потоків у проточній частині ВЕС за допомогою програмного комплексу FlowVision на основі експериментальних даних;
- розробити методику розрахунку ВЕС вакуумного агрегату.

Об'єкт дослідження – робочий процес вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату на базі рідинно-кільцевого вакуумного насоса.

Предмет дослідження – вихрова ежекторна ступінь вакуумного агрегату.

Методи дослідження. Задачі дослідження вирішувалися за допомогою розрахунково-аналітичного методу, методу математичного моделювання робочого процесу вихрової ежекторної ступені і експериментальних методів дослідження.

Розрахунково-аналітичний метод базується на класичних законах термодинаміки і газодинаміки. Математичне моделювання проводилося за допомогою програмного комплексу FlowVision, що призначений для моделювання тривимірних течій рідини і газу в технічних об'єктах, а також візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки.

Фізичний експеримент включав в себе дослідження впливу основних геометричних параметрів проточної частини вихрової ежекторної ступені і термодинамічних параметрів взаємодіючих середовищ на характеристики вихрової ежекторної ступені і вакуумного агрегату в цілому.

Проведення співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними проводилося за допомогою статистичних методів розрахунку відхилень експериментальних і теоретичних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- визначено основні відмінності між роботою ежекторної ступені вакуумного агрегату і автономно працюючим ежекторним пристроєм;

– за допомогою газодинамічних функцій встановлено зв'язок між геометричними параметрами проточної частини вихрової ежекторної ступені, витратними і термодинамічними параметрами всмоктуваного потоку вакуумного агрегату;

– отримано геометричні співвідношення і режимні параметри для вихрової ежекторної ступені, що забезпечують найбільшу ефективність вакуумного агрегату;

– вперше проведено ексергетичний аналіз енергоефективності вакуумного агрегату на базі рідинно-кільцевого вакуумного насоса з вихровою ежекторною ступінню.

Практичне значення отриманих результатів:

– виготовлено експериментальний зразок ежекторної ступені та створено експериментальний стенд дослідження характеристик вакуумних агрегатів на базі РКВН;

– розроблено практичні рекомендації щодо проектування вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату;

– розроблено інженерну методику розрахунку вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату;

– результати дисертаційної роботи впроваджено на Охтирському сиркомбінаті (Сумська обл.), в Інституті садівництва (Київська обл.) та в навчальному процесі СумДУ.

Особистий внесок здобувача. У написаних у співавторстві наукових публікаціях, що розкривають результати, отримані у процесі виконання дисертаційної роботи, здобувачу належать:

[1] – проведення аналізу конструктивних схем вакуумних агрегатів на основі побудови балансових рівнянь масових та енергетичних потоків; [3] – отримання і аналіз результатів експериментальних досліджень щодо впливу основних конструктивних співвідношень проточної частини на витратні і енергетичні характеристики вихрової ежекторної ступені; [4] – побудова теоретичної концепції системи конденсації на базі рідинно-кільцевого вакуум-насоса; [5] – створення параметричної тривимірної моделі, поставлення задачі, задання граничних умов, аналіз результатів розрахункового експерименту; [6] – проведення аналізу особливості роботи вихрової ежекторної ступені як компонента вакуумного агрегату, прогнозування змін характеристик ежекторної ступені залежно від режиму роботи агрегату; [7] – виконання патентного пошуку інформації в аналогічних сферах використання вакуумного агрегату.

Поставлення задач, вибір методів дослідження та аналіз отриманих результатів проводилися спільно з науковим керівником кандидатом технічних наук, доцентом (професором кафедри ТТФ) В.М. Арсеньєвим.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:

- 2-й, 3-й та 4-й Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” у 2002, 2003 і 2005 роках (м. Одеса);

- 13-й Міжнародній науково-технічній конференції з компресоробудування “Компресорна техніка і пневматика у ХХІ столітті” у 2004 році (м. Суми);
- 11-й Міжнародній науково-технічній конференції “Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного і компресорного обладнання”-“Гервікон” у 2005 році (м. Суми);
- 11-й Міжнародній науково-технічній конференції “Гідроаеромеханіка у інженерній практиці” у 2006 році (м. Київ);
- Міжнародній науковій конференції “Технічні і технологічні гази. Компресорне обладнання в технологічних процесах” у 2006 році (м. Суми);
- науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів СумДУ (щорічно з 2002 по 2006 рік включно).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 7 наукових праць, з них 5 – у фахових виданнях, затверджених переліком ВАКУ України, 1 – у працях міжнародної науково-технічної конференції, отримано 1 патент на винахід за темою дисертаційного дослідження.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складається із 160 сторінок, у тому числі 55 рисунків, з яких 2 – на окремих сторінках, 4 таблиці, бібліографія із 105 джерел на 10 сторінках, 2 додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проведення дослідження робочого процесу і отримання характеристик вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату. Показана доцільність використання вихрової ежекторної ступені для підвищення витратних характеристик вакуумного агрегату. Зазначено про необхідність розроблення методики розрахунку геометричних параметрів проточної частини ежекторної ступені. Сформульовані мета та задачі дослідження, даються загальна характеристика роботи, наукова новизна отриманих результатів.

У першому розділі викладені результати інформаційно-аналітичного огляду сучасного стану проблеми, пов'язаної з роботою вакуумних агрегатів на базі РКВН. Виконано огляд опублікованих праць з дослідження робочого процесу ежекторних пристроїв.

Сучасний стан дослідження вакуумних агрегатів на базі 2–ступеневих РКВН найбільш повно висвітлено у працях В.Д. Лубенця, І.В. Автономової, Ю.М. Вертепова. Характеристики вакуумних агрегатів прийнято зображувати у вигляді залежності відносної об'ємної продуктивності $\bar{V} = V_f / V_N$ від відносного тиску всмоктування $\bar{D} = D_f / D_A$, параметри потоків “а”, “п”, “с” належать до активного, пасивного і змішаного потоку відповідно (рис.1).

Послідовним включенням РКВН (характеристика 1) з повітряним ежектором (характеристика 2) можливе одержання регламентованого рівня

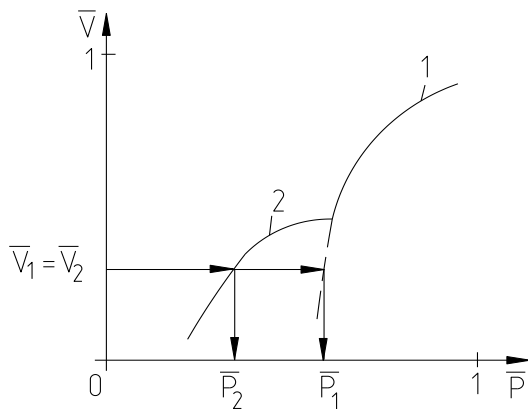


Рис.1. Витратна характеристика вакуумного агрегату

під керівництвом Л.Т. Караганова.

Існуючі конструкції ежекторних пристроїв, що використовуються в промисловості, можна розрізнити за такими категоріями:

- принцип ежекції;
- робоче середовище і його термодинамічні параметри;
- призначення пристрою.

За принципом ежекції виділяють пряموструминні і вихрові ежекторні пристрої. Як робоче середовище може використовуватися як повітря з атмосферним тиском, так і стиснене середовище. Класифікація ежекторних пристрів за призначенням відбувається за величиною ступеня стиснення і за властивістю взаємодіючих середовищ.

Робочий процес пряموструминного ежекторного пристрою давно і досить докладно досліджено такими авторами, як: С.А. Христіанович, Ю.Н. Васильєв, Г.Н. Абрамович, Є.Я. Соколов, Н.М. Зінгер та інші. Виявлено, що для ефективної роботи ежекторного пристрою необхідно використовувати спеціально спрофільоване надзвукове сопло Лавалю. Крім того, виявлено, що існує досить вузька область ефективної роботи ежекторного пристрою в надзвуковому режимі, а також відносно великі масогабаритні показники, за рахунок використання осердального дифузора.

Інший тип ежекторного пристрою, що відрізняється за принципом ежекції – вихровий ежектор. Під керівництвом М.Г. Дубинського створено та досліджено вихрові вакуумні насоси. Виявлено, що при подачі в тангенціально розташовані канали підводу активного потоку, в приосьовій області приймальної камери утворюється зона зниженого тиску, так званий ефект Ранка, яка сприяє ежектуванню пасивного потоку з відкачуваної ємності.

тисків значно перевищуючим рівень, одержуваний за допомогою одноступінчастої системи. Вперше РКВН з передвключеним повітряним ежектором був розроблений в 1956 році фірмою “Siemens”. Процес агрегатування відбувається шляхом встановлення на всмоктувальний патрубок РКВН ежекторної ступені. У КХТІ ім. С.М. Кірова вивченню роботи РКВН з ежектором присвячені праці І.Я. Райзмана, А.І. Рудакова, а також праці у НВО “Кріогенмаш”

Під керівництвом В.С. Мартиновського проведені дослідження щодо підвищення ефективності вихрових апаратів. В.М. Бродянським та А.В. Мартиновим проведені дослідження щодо охолоджуваних вихрових пристроїв. А.П. Меркуловим, А.Д. Сусловим і В.І. Метеніним виявлено основні закономірності роботи вихрового ежектора і виявлено вплив режимних і конструктивних параметрів на коефіцієнт ежекції. Подальший розвиток теорії вихрового ежектора отримано в МВТУ ім. М.Е. Баумана у працях В.І. Єпіфанової. Особливістю запропонованої моделі вихрового ежектора, є те, що в потоці, який обертається, виділяються дві області:

- область з постійною циркуляцією (вільний вихор);
- область з постійною кутовою швидкістю обертання (вимушений вихор, що підпорядковується закону обертання твердого тіла).

Вивчаючи процеси в ежекторних пристроях, дослідники дійшли висновку, що найбільш ефективним є пристрій, що комбінує в собі пряموструминні і вихрові потоки. Так, в ЦАГІ ім. М.Є. Жуковського під керівництвом Ю.К. Аркадова розроблено ежекторний пристрій, в якому сопла активного потоку розташовано по спіралі вздовж змішувальної камери, що підвищило ефективність ежекторного пристрою.

У дисертаційній роботі наводиться аналіз області використання вихрових апаратів. Це вихрові апарати для фазового розділення компонентів, що конденсуються у газорідних сумішах, вихрові сепаратори газової суміші, вихрові ректифікатори, вихрові апарати абсорбційного очищення газу, циклонні й вихрові пиловловлювачі, повітроохолоджувачі, вихрові холодильники, вихрові переносні й пересувні кондиціонери, вихрові ежектори.

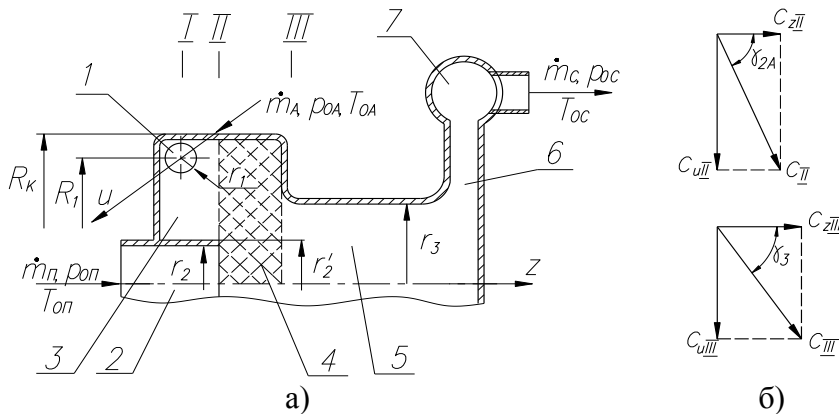
Основні конструктивні й геометричні фактори, що впливають на ефективність роботи вихрового ежектора: кількість, тип і форма каналів введення активного потоку; діаметр і довжина приймальної камери; довжина і діаметр трубки введення пасивного потоку; вид розкруткового дифузора; ширина щілини і діаметр щілинного дифузора.

Крім того, існують технологічні параметри, що також впливають на ефективність вихрового ежектора. Певний ступінь закручення активного потоку, що можна оцінити відношенням обертального імпульсу до осевого імпульсу в масштабі характерного лінійного розміру, може помітно підвищити рівень турбулентності і якість змішування взаємодіючих потоків і тим самим сприяти поліпшенню робочих характеристик ежектора.

У першому розділі формулюються мета і задачі дослідження. Описані методи і засоби для досягнення поставленої мети.

У **другому розділі** обґрунтовані основні відмінності роботи ВЕС від автономно працюючого ежекторного пристрою, наведено розрахункову модель взаємодії потоків у ВЕС вакуумного агрегату.

Використання закономірностей, співвідношень, методик, що описують процеси в автономно працюючому ежекторі, не завжди є обґрунтованим і правильним для ежекторної ступені вакуумного агрегату. Принципова відмінність ежекторної ступені вакуумного агрегату від самостійного функціонуючого ежектора будь-якого типу полягає в існуванні примусового відкачування потоків через передбачені конструкцією соплові вводи або канали, що і визначає основні відмінності у робочому процесі. При роботі ВЕС у складі вакуумного агрегату відсутня приосьова область незруйнованого вихрового шнура, що характерно для автономно працюючого вихрового ежектора. Здебільшого, як робоче середовище активного потоку в ежекторній ступені використовується атмосферне повітря без зовнішніх впливів на його термічні параметри. Для подібних умов при підтримці в змішувальній камері тиску нижче атмосферного, за рахунок роботи вакуум-насоса, через активне сопло буде відбуватися втікання повітря з навколишнього середовища всередину вихрового апарата. Масова витрата такого потоку залежить від продуктивності вакуум-насоса і обмежена умовами досягнення критичних параметрів.



Умовні позначення: 1 – сопло активного потоку; 2 – сопло пасивного потоку; 3 – вихрова камера; 4 – зона змішування вихрової камери; 5 – циліндрична камера; 6 – радіальний дифузор; 7 – збірна камера. Розрахункові перетини: I – вихід активного потоку у вихрову камеру; II – вхід активного та пасивного потоків в зону змішування; III – вхід змішаного потоку в циліндричну камеру.

Рис. 2. Розрахункова схема вихрової ежекторної ступені:

а) проточна частина;

б) кінематичні параметри активного потоку в перетині II і змішаного потоку в перетині III;

де C_u , C_z – тангенціальна і осьова складові швидкості у відповідних перетинах, м/с; γ_{2A} , γ_3 – кути нахилу векторів абсолютної швидкості активного і змішаного потоків у перетинах II та III; \dot{m} – масова витрата, кг/с, P_0 – тиск загальмованого потоку, Па, T_0 – температура загальмованого потоку, К.

Загальні положення моделі взаємодії потоків у ВЕС базуються на ряді припущень і обмежень: робоче середовище розглядається в ідеально-газовому наближенні; потік у всіх циліндричних порожнинах – осесиметричний; радіальна складова абсолютної швидкості дорівнює нулю; переміщення потоків в осьовому напрямку відбувається по всьому об'єму вихрової камери та патрубку дифузора (відсутня область незруйнованого вихрового шнура); відсутня поворотна осьова течія газу; пасивний потік підводиться без закручення і змішування потоків починається з перетину II (рис.2) на поверхні течії з радіусом r_2 та проявляється в передачі моменту кількості руху від активного потоку до пасивного.

Наведена розрахункова модель вихрової ежекторної ступені базується на використанні закону збереження імпульсу потоку в межах перетинів *II* та *III*. У перетині *II* розглядається сума імпульсів активного та пасивного потоків, у перетині *III* потоки та їх імпульси не розділяються.

Рівняння збереження імпульсу потоку з урахуванням втрат і реакції стінки має вигляд:

$$\hat{I}^*(\lambda_{III}, \gamma_{III}) = \hat{I}(\psi_A \cdot \lambda_{IIA}, \gamma_{2A}) + \hat{I}(\psi_I \cdot \lambda_{III}), \quad (1)$$

де $\hat{I}^*(\lambda_{III}, \gamma_{III})$ – модифікований імпульс змішаного потоку в перетині *III*, що враховує імпульс, обумовлений реакцією стінки приймальної камери; $\lambda = C/a_{ED}$ – приведена швидкість; ψ – коефіцієнт, що враховує зменшення швидкості через втрату імпульсу.

Рівняння (1), перетворене відносно коефіцієнта ежекції з використанням газодинамічних функцій, є основним рівнянням, що описує взаємодію потоків:

$$U\sqrt{\theta} = \frac{\hat{Z}(\psi_A \cdot \lambda_{IIA}, \gamma_{2A}) - Z^*(\lambda_{III}, \gamma_{III})}{Z^*(\lambda_{III}, \gamma_{III}) - \hat{Z}(\psi_I \cdot \lambda_{III})}, \quad (2)$$

де $\hat{Z}(\lambda, \gamma) = \frac{1}{\cos \gamma} \left[\left(\frac{2k}{k+1} \cos^2 \gamma - \frac{k-1}{k+1} \right) \lambda + \frac{1}{\lambda} \right]$ – складна газодинамічна функція (ГДФ);

$\theta = \frac{R_I \dot{O}_{0П}}{R_A \dot{O}_{0A}}$ – відношення добутку газових сталей і температур гальмування пасивного і активного потоків; k – показник ізоентропи для повітря; $Z^*(\lambda_{III}, \gamma_{III})$ – модифікована ГДФ, що визначає закон розподілу приведеної швидкості λ_{III} і кута нахилу γ_{III} по радіусу вихрової камери.

На відміну від пряموструминних ежекторів, у ВЕС існують два розділених неспівосних соплових підводи – для активного та пасивного потоків. У цьому випадку, використовуючи рівняння витрат, виражені через газодинамічну функцію $q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$, можна отримати таке рівняння для коефіцієнта ежекції:

$$U\sqrt{\theta} = \frac{1}{\Pi} \cdot \frac{r_2^2}{N \cdot r_1^2} \cdot \frac{q(\lambda_{III})}{q(\lambda_{v1})}, \quad (3)$$

де $\dot{I} = p_{0A}/p_{0I}$ – ступінь розширення активного потоку; $q(\lambda_{III})$, $q(\lambda_{v1})$ – приведена масова швидкість (приведена витрата) пасивного потоку в перетині *II* і активного потоку в перетині *I*; N – кількість каналів вводу активного потоку.

Для задач, що пов'язані із знаходженням характеристики ступеня стиснення пасивного потоку, яка визначає максимально досяжний вакуум на всмоктуванні агрегату $\varepsilon = f(P_{II}, U)$, використовується рівняння нерозривності для ежектора у вигляді:

$$1 + U\sqrt{\theta} = \frac{\varepsilon}{\sigma_3 \Pi} \cdot \frac{F_{III}}{F_1} \cdot \frac{\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \gamma_{III}}{q(\lambda_{U1})}, \quad (4)$$

де σ_3 – коефіцієнт відновлення тиску в розрахунковому перетині III; $F_{III} = \pi r_3^2$ – площа перетину III; $F_1 = \pi r_1^2$ – площа зрізу каналу вводу активного потоку; $\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \gamma_{III}$ – витратна ГДФ змішаного потоку в перетині III.

Алгоритм розв'язання задачі з визначення коефіцієнта ежекції при заданих параметрах РКВН (P_C, \dot{m}_C) та заданому тиску всмоктування вакуумного агрегату $P_{i\bar{i}}$ зводиться, як і для прямоструминних ежекторів, до звернення до граничних режимів за пасивним потоком. Граничний режим, що визначає максимальний коефіцієнт ежекції настає за умови досягнення критичних параметрів пасивного потоку $q(\lambda_{III}) = 1$, що виражається таким рівнянням:

$$U_{\max} \sqrt{\theta} = \frac{\frac{A_3}{\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \gamma_{III}} - \frac{A_2}{\Pi \cdot q(\lambda_{U1})}}{1 - \frac{A_3}{\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \gamma_{III}}}, \quad (5)$$

$$\text{де } A_3 = \frac{\mu \cdot \sigma_3}{\varepsilon}; \quad A_2 = \frac{R_K^2 - r_2^2}{N \cdot r_1^2}; \quad \mu = \frac{F_{II}}{F_{III}} = \left(\frac{R_K}{r_3} \right)^2.$$

У дисертації наводяться розрахункові рівняння для осереднених газодинамічних функцій, що використовуються у рівняннях наведеної газодинамічної моделі.

У **третьому розділі** представлена конструкційна схема експериментального стенда з дослідження характеристик ВЕС вакуумного агрегату на базі РКВН і оцінка похибок вимірювань. Загальний вигляд досліджуваної вихрової ежекторної ступені наведено на рис. 3. ВЕС складається з корпусу вихрової камери 1 з виконаними в ній тангенціально розташованими каналами підводу активного потоку 2. Циліндрична камера 3 утворюється за рахунок використання проставки 4. Канал підводу пасивного потоку 5 виконано у соплі підводу пасивного потоку 6, що надійно фіксується підвідним патрубком 7. Щілинний дифузор виконано у вигляді плоскої пластини 8. Завдяки наявності гвинта 9 пластина має змогу переміщатися в осьовому напрямку за нарізкою, що виконана в стінці корпусу 10. У процесі проведення експериментальних досліджень змінювалися такі параметри проточної частини: діаметр сопел пасивного потоку, кількість каналів підводу активного потоку та їх діаметр, довжина і діаметр вихрової камери.

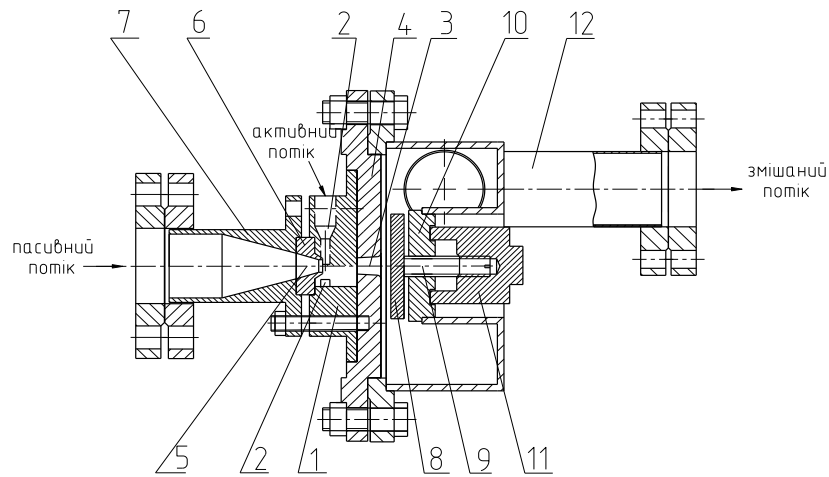


Рис. 3. Вихрова ежекторна ступінь

Отримано експериментальні витратні характеристики складових компонентів вакуумного агрегату (рис.4).

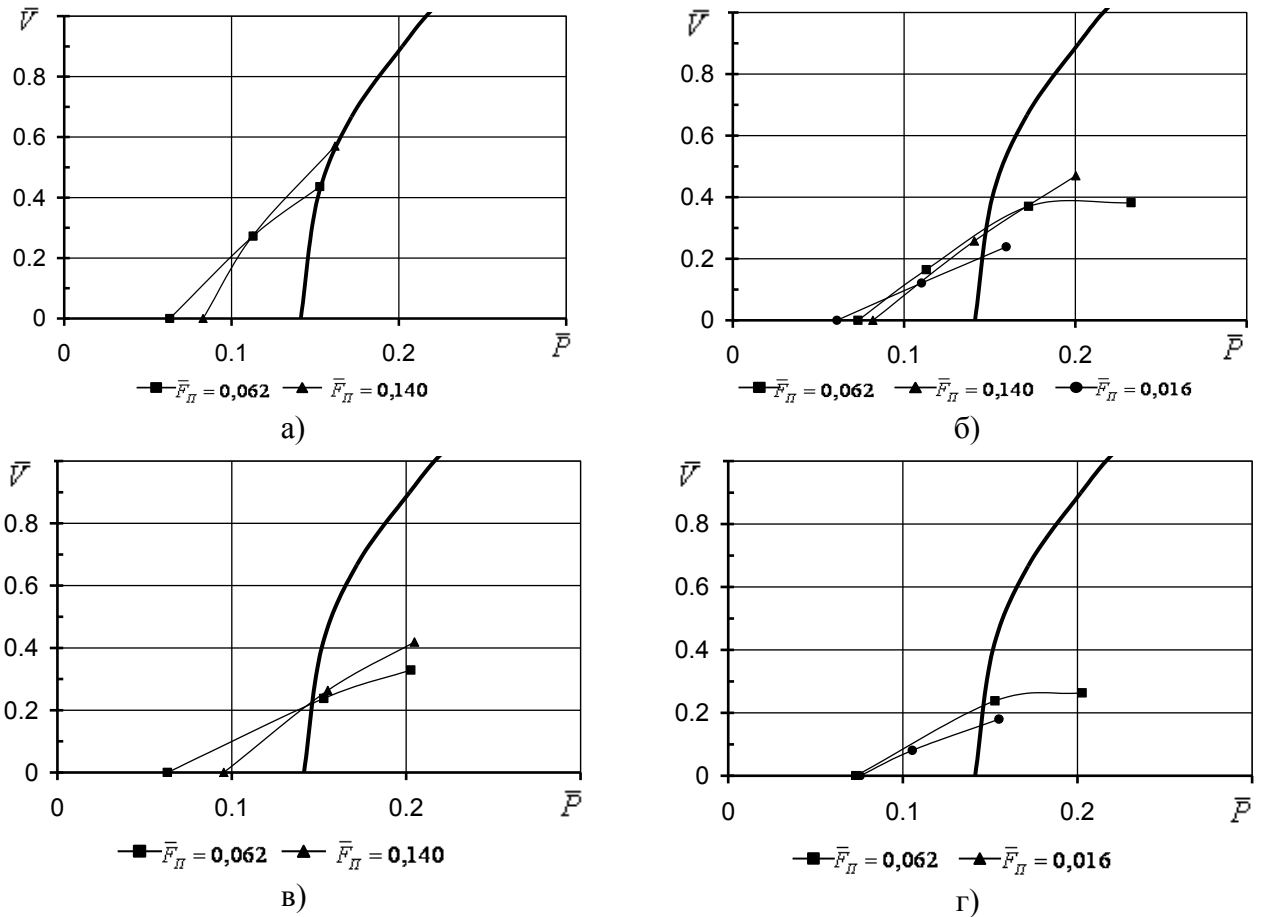


Рис.4. Характеристики компонентів вакуумного агрегату : а)– $\bar{F}_A = 0,009$; б)– $\bar{F}_A = 0,017$;

в)– $\bar{F}_A = 0,024$; г)– $\bar{F}_A = 0,048$

Аналіз всіх побудованих характеристик свідчить, що використання ВЕС дозволяє розширити діапазон роботи вакуумного агрегату за тиском всмоктування і за об'ємною продуктивністю в даному діапазоні, а саме: збільшується рівень досяжного вакууму на 5–8,5% залежно від геометричних співвідношень проточної частини $\bar{F}_A = N(r_1/R_K)^2$ і $\bar{F}_I = (r_2/R_K)^2$.

Практичний інтерес являє собою залежність коефіцієнту стиснення пасивного потоку $\varepsilon = p_{oc}/p_{fi}$ від коефіцієнта ежекції $U = \dot{m}_f / \dot{m}_\lambda$, що визначається відношенням масових продуктивностей пасивного потоку до активного. Залежність $\varepsilon = f(U)$ зображена на рис.5.

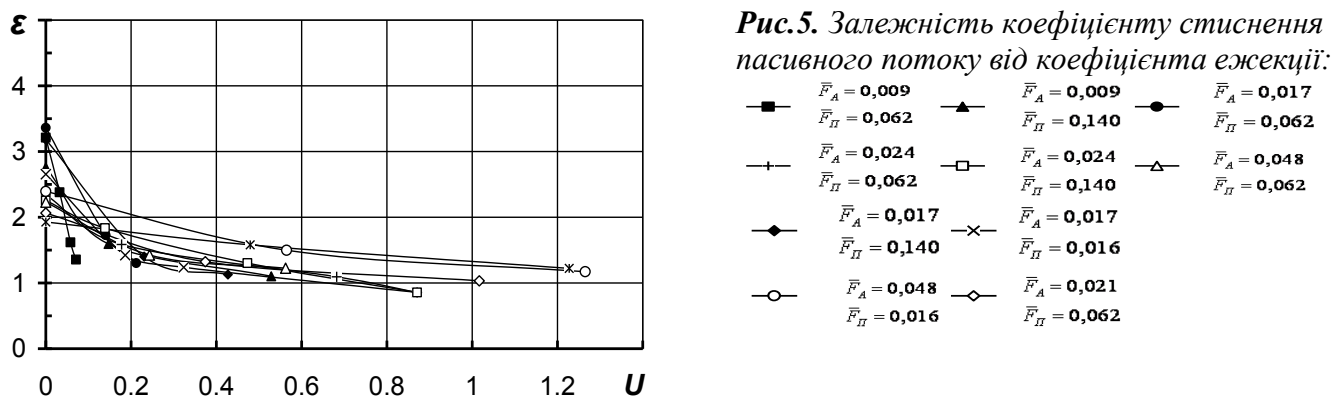


Рис.5. Залежність коефіцієнту стиснення пасивного потоку від коефіцієнта ежекції:

■ $\bar{F}_A = 0,009$	▲ $\bar{F}_A = 0,009$	● $\bar{F}_A = 0,017$
$\bar{F}_H = 0,062$	$\bar{F}_H = 0,140$	$\bar{F}_H = 0,062$
+ $\bar{F}_A = 0,024$	□ $\bar{F}_A = 0,024$	△ $\bar{F}_A = 0,048$
$\bar{F}_H = 0,062$	$\bar{F}_H = 0,140$	$\bar{F}_H = 0,062$
◆ $\bar{F}_A = 0,017$	× $\bar{F}_A = 0,017$	
$\bar{F}_H = 0,140$	$\bar{F}_H = 0,016$	
○ $\bar{F}_A = 0,048$	◇ $\bar{F}_A = 0,021$	
$\bar{F}_H = 0,016$	$\bar{F}_H = 0,062$	

Найбільше значення коефіцієнта ежекції відповідає найменшому значенню ступеня стиснення пасивного потоку. Іншими словами, якщо потрібно отримати найбільшу продуктивність вакуумного агрегату, необхідно забезпечити найменший рівень вакууму на всмоктуванні вакуумного агрегату і навпаки.

Наведено аналіз похибок вимірювань. Величина відносної похибки вимірювання продуктивності агрегату не перевищує 3%, питомої потужності – не перевищує 0,4%.

У **четвертому розділі** наводяться результати розрахункового експерименту, що проводився за допомогою програмного комплексу FlowVision, наведена методика розрахунку характеристик ВЕС, показана оцінка енерго-ефективності вакуумного агрегату з використанням ВЕС, а також наведена концепція розрахунку системи вакуумного охолодження рідини.

Процес розрахунку течії взаємодіючих потоків у проточній частині вихрової ежекторної ступені складався з декількох етапів: побудови твердотільної параметричної моделі ВЕС з виділенням області розрахунку та її імпортування у FlowVision; вибору математичної моделі; задання граничних умов; задання початкової розрахункової сітки та критеріїв її адаптації; проведення розрахунку; перегляду результатів розрахунку у графічній формі та збереження даних у файлі. Особливістю проведеного розрахункового моделювання є те, що вхідні й вихідні граничні умови задавалися згідно з отриманими експериментальними даними на стенді дослідження вакуумних агрегатів. У результаті розрахункового моделювання отримано дані розподілу тангенціальної λ_{v1} і осьової λ_z складових приведеної швидкості потоку по радіусу камери R в характерних перетинах проточної частини ВЕС.

Проаналізувавши результати розрахункового моделювання зроблено висновок, що течія потоків у вихровій камері ВЕС підпорядковується законам вільного і вимушеного вихорів; форма епюр тангенціальної і осьової складової швидкості практично не залежить від режимних параметрів роботи ежекторної ступені, а залежить більшою мірою від геометричного співвідношення

елементів проточної частини; оптимальне число каналів уведення активного потоку дорівнює двом при симетричному розташуванні каналів щодо осі приймальної камери; оптимальний кут нахилу каналів уведення активного потоку щодо осі вихрової камери становить 60° ; показано, що відсутня приосьова область незруйнованого вихрового шнура, відсутні зворотні течії газу.

У дисертаційній роботі наведено методику розрахунку характеристики ВЕС, яка базується на системі рівнянь, що зв'язують режимні і геометричні параметри всіх взаємодіючих потоків у вигляді залежності (6):

$$\left. \begin{aligned} q(\lambda_{v1}) &= \frac{q(\lambda_{III}) \cdot \cos \gamma_{III}}{\Pi \cdot A_3 (1 + U \sqrt{\theta}) F_1 / F_{II}} \\ q(\lambda_{v1}) &= \frac{\bar{F}_2 \cdot q(\lambda_{III})}{U \sqrt{\theta} \cdot \Pi} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де $\bar{F}_2 = r_2^2 / N \cdot r_1^2$ – відношення площин вихідних перетинів сопел пасивного та активного потоків.

Запропоновано степеневий закон розподілу тангенціальної складової швидкості по радіусу вихрової камери в перетині I:

$$\lambda_{v1} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \frac{1 + \frac{k-1}{k+1} (\lambda_{III}^2)}{\Pi^{\frac{k-1}{k}}} \right]} \cdot \bar{r}_2^n, \quad (7)$$

де $\bar{r}_2 = r_2 / R_K$ – відносний радіус сопла пасивного потоку; n – показник степеня функції.

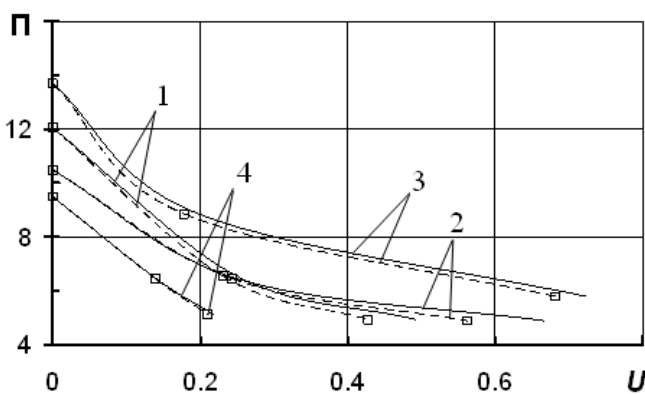


Рис.6. Залежність ступеня розширення активного потоку від коефіцієнта ежекції
 1- $n=0,4$; $\bar{F}_2 = 2,56$.
 2- $n=0,6$; $\bar{F}_2 = 5,76$.
 3- $n=1,2$; $\bar{F}_2 = 3,55$.
 4- $n=1,3$; $\bar{F}_2 = 1,28$.
 — розрахунок — експеримент

Шляхом введення степеневого закону розподілу тангенціальної складової швидкості вдалося досягти задовільних результатів збігання експериментальних і розрахункових залежностей (рис.6). У середньому величина неузгодженості становить 6%.

Обробка результатів досліджень дозволила отримати рівняння, що встановлює залежність показника функції n від коефіцієнта ежекції U при постійному ступені розширення активного потоку Π :

$$\text{при } \Pi=6 \quad n=3,37\exp(-2,39U); \quad (8)$$

$$\text{при } \Pi=7 \quad n=2,56\exp(-2,23U); \quad (9)$$

$$\text{при } \Pi=8 \quad n=1,61\exp(-1,78U); \quad (10)$$

$$\text{при } \Pi=9 \quad n=1,29\exp(-1,62U). \quad (11)$$

У четвертому розділі проведено оцінку енергоефективності як вакуумного агрегату в цілому, так і його складових компонентів. У зв'язку з тим, що середовище активного потоку як потоку атмосферного повітря не є енергоносієм через нульовий ексергетичний потенціал, стає некоректним розгляд енергетичної ефективності ежекторної ступені у вигляді співвідношення перепадів ентальпії пасивного й активного потоків для представлення адіабатного коефіцієнта корисної дії (ККД). У цьому випадку коректніше виконувати оцінку енергоефективності вакуумного агрегату на базі ексергетичного аналізу. Оцінку енергоефективності проведено для трьох розрахункових схем, наведених на рис. 7.

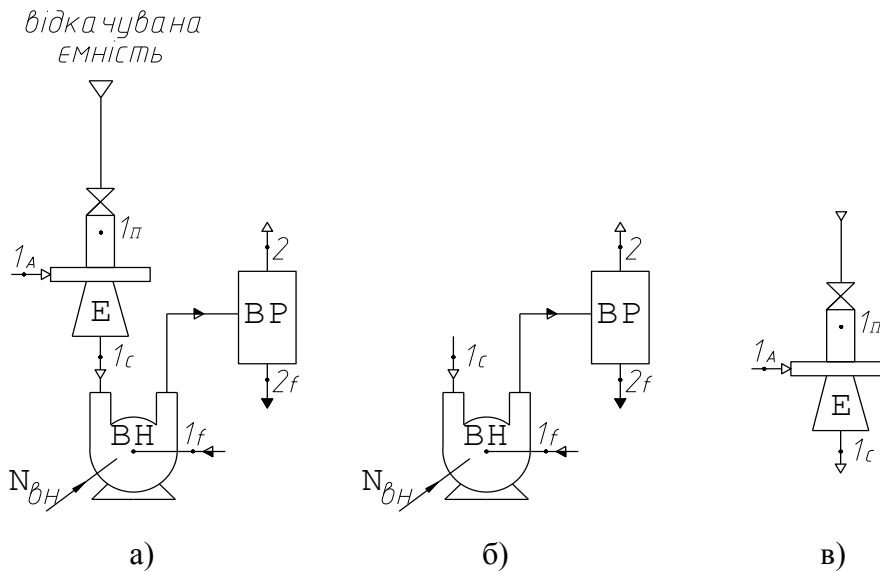


Рис.7. Розрахункові схеми: а) вакуумний агрегат; б) вакуумний насос; в) вихрова ежекторна ступінь. Позначено: ВН – вакуумний насос; ВР – віддільник рідини; Е – вихрова ежекторна ступінь.

Виконується відкачування газоподібного середовища з параметрами в точці $1П$ (пасивний потік). Активним потоком ежекторної ступені є атмосферне повітря з параметрами в точці $1А$. Рідина, що необхідна для роботи рідиннокільцевого вакуум-насоса, надходить із системи водопостачання з параметрами $1f$. У віддільнику рідини відбувається сепарація рідини від газового потоку, що залишає систему з параметрами в точці 2 , а вода відводиться з параметрами $2f$. Необхідно виділити контур розрахункової схеми з вхідними і вихідними потоками, що враховують потоки “палива” і потоки “продукту”, згідно із схемами, що наведено на рис. 7.

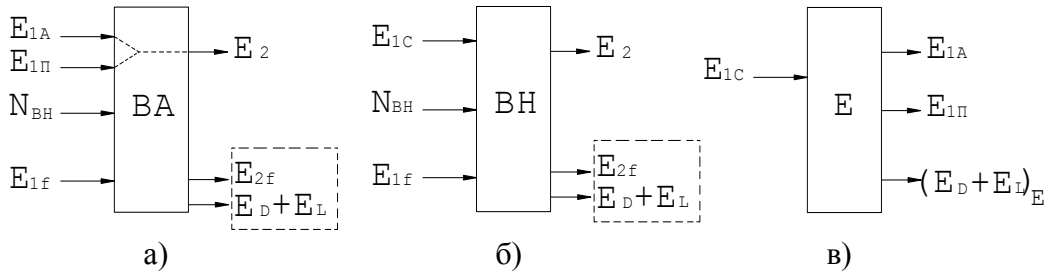


Рис.8. Схеми ексергетичних перетворень

Для кожної із розрахункових схем побудовано схеми ексергетичних перетворень: для вакуумного агрегату (рис.8а), для вакуумного насоса (рис.8б) і для вихрової ежекторної ступені (рис.8в). Зазначені на схемах величини E відповідають значенням ексергії матеріальних потоків газових і рідинних середовищ на вході і виході з контура. Величина E_D+E_L характеризує потоки деструкції і втрат ексергії. Для будь-якої системи ексергетичних перетворень ексергетична ефективність визначається як відношення ексергетичного потоку продукту E_P до ексергетичного потоку палива (ексергоносія) E_F . Ексергетична ефективність (ексергетичний ККД) у загальному вигляді визначається залежністю (12):

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

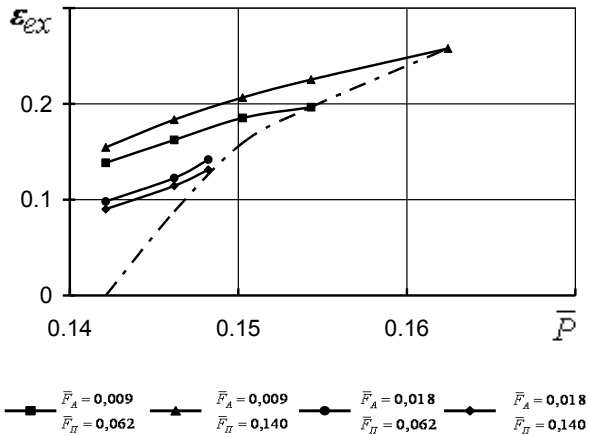


Рис.9. Ексергетична ефективність вакуумного агрегату

Проаналізувавши залежність, наведену на рис.9, можна відзначити, що для постійного відносного тиску всмоктування вакуумний агрегат з ВЕС має більше значення ексергетичної ефективності, ніж вакуумний агрегат без використання ежектора (штрихпунктирна лінія). Показник ексергетичного ККД, що дорівнює 0,26, виявлено у вакуумного агрегату з вихровою ежекторною ступінню для геометричного виконання $\bar{F}_A = 0,009, \bar{F}_F = 0,140$. ВЕС має більший ексергетичний ККД в порівнянні з вакуумним агрегатом в цілому. Найбільший ексергетичний ККД ВЕС (рис.10),

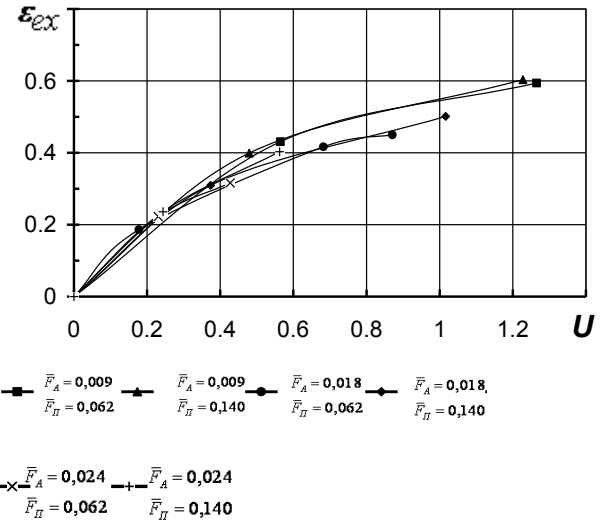


Рис.10. Ексергетична ефективність ВЕС

що отриманий дорівнює 0,6 при значенні коефіцієнта ежекції 1,25. Причому ексергетична ефективність не залежить від геометричного виконання проточної частини ВЕС, а залежить від параметрів взаємодіючих потоків.

У даному розділі наведено методику розрахунку системи вакуумного охолодження водних розчинів, що дозволяє визначати мінімальну об'ємну продуктивність вакуум-насоса або вакуумного агрегату, а також визначати час охолодження розчину.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана науково-технічна задача дослідження робочого процесу вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату на базі рідинно-кільцевого вакуум-насоса.

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Виявлено основні відмінності автономно працюючого ежектора від ежекторної ступені вакуумного агрегату.

Розв'язана комплексна задача взаємовпливу компонентів вакуумного агрегату (ежекторної ступені і вакуум-насоса), що раніше не виконувалася.

2. Розглянуто робочий процес і запропоновано модель взаємодії потоків у проточній частині вихрової ежекторної ступені. Модель течії базується на законі збереження імпульсів потоку в межах характерних перетинів.

Отримано основне розрахункове рівняння, що об'єднує три режимних параметри вихрової ежекторної ступені (ступінь розширення активного потоку, ступінь стиснення пасивного потоку, коефіцієнт ежекції) з геометричними параметрами проточної частини ежекторної ступені.

3. Проведено комплексні експериментальні дослідження робочого процесу вихрової ежекторної ступені і отримано витратні характеристики вакуумного агрегату.

Виявлено, що використання ВЕС дозволяє розширити діапазон роботи вакуумного агрегату за тисками всмоктування і за об'ємною продуктивністю в даному діапазоні, а саме збільшується рівень досяжного вакууму на 5-8,5% залежно від геометричних співвідношень проточної частини.

4. Отримано дані розподілу тангенціальної та осьової складових компонентів швидкості в характерних перетинах проточної частини ежекторної ступені і розподіл поля тиску на основі розрахункового експерименту за допомогою програмного комплексу FlowVision.

Показано, що відсутня приосьова область незруйнованого вихору, відсутні поворотні течії газу в проточній частині ВЕС; оптимальний кут нахилу каналу введення активного потоку відносно осі приймальної камери становить 60° .

5. Виконано перевірку запропонованої моделі взаємодії потоків у проточній частині вихрової ежекторної ступені шляхом зіставлення розрахунково-теоретичних залежностей з експериментальними даними. Шляхом введення в закон взаємодії потоків $\lambda_{v1} r^n$ показника степеня n вдається досягти задовільного збігання експериментальних і теоретичних результатів. Проведені експериментальні і теоретичні дослідження покладені в основу методики розрахунку вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату.

6. Вперше проведено ексергетичний аналіз енергоефективності складових компонентів вакуумного агрегату. Виявлено, що вакуумний агрегат з вихровою ежекторною ступінню має більше значення ексергетичного ККД, що дорівнює 0,26, ніж вакуумний агрегат без використання ежектора.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено на Охтирському сиркомбінаті (Сумська обл.) для використання вакуумного агрегату на базі РКВН у системі вакуумного охолодження молока; в Інституті садівництва Української академії аграрних наук (Київська обл.) як методика розрахунку системи зберігання плодів під вакуумом технологічному процесі зберігання і переробки плодів; у навчальному процесі СумДУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Арсеньев В.М., Мелейчук С.С. Методика выбора водокольцевого вакуумного агрегата для систем вакуумного охлаждения водных растворов// Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції (додаток до журналу “Холодильна техніка і технологія”.-2003.-№4.-С.94-98.)

2. Мелейчук С.С. Техническое содержание и задачи экспериментальных исследований вакуумных агрегатов на базе жидкостно-кольцевых машин// Вісник Сумського державного університету.-2004.-№13.- С.80-85.

3. Мелейчук С.С., Арсеньев В.М. Экспериментальные исследования воздушной ежекторной ступени жидкостно-кольцевой машины// Холодильна техніка і технологія.-2005.-№6.-С.45-49.

4. Мелейчук С.С., Арсеньев В.М. Повышение эффективности жидкостнокольцевых машин в системах конденсации// Праці 11-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Герметичність, вібраційність та екологічна безпека насосного і компресорного обладнання”-“Тервікон-2005”.-Суми, 2005.-Т.3.-С.146-150.

5. Арсеньев В.М., Мелейчук С.С., Кочевский А.Н. Исследование взаимодействия потоков газа в воздушном вихревом эжекторе// Вісник Сумського державного університету.-2006.-№10.- С.143-153.

6. Арсеньев В.М., Мелейчук С.С. Анализ возможности создания вакуумных агрегатов на базе жидкостно-кольцевых вакуум-насосов с предвключенной вихревой эжекторной ступенью// Компрессорное и энергетическое машиностроение.-2006.-№3(5).-С.27-32.

7. Арсеньев В.М., Мелейчук С.С. Рідиннокільцевий вакуумний насос: Патент на винахід №75212 Україна; МПК (2006) F04c7/00; F04c19/00; Опубл. 15.03.2006; Бюл. №3.

АНОТАЦІЯ

Мелейчук С.С. Робочий процес і характеристики вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.15 – вакуумна і компресорна техніка. - Сумський державний університет, Суми, 2007.

У дисертаційній роботі наведені результати експериментального і теоретичного дослідження робочого процесу вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату. Визначено вплив основних геометричних параметрів проточної частини ежектора на його характеристики.

Основним змістом роботи є отримання основного розрахункового рівняння, що об'єднує три режимних параметри вихрової ежекторної ступені (ступінь розширення активного потоку, ступінь стиснення пасивного потоку і коефіцієнт ежекції) з геометричними параметрами проточної частини ежекторної ступені. Розрахункова модель базується на законі збереження імпульсу у розрахункових перетинах.

Показано суттєву відмінність у роботі вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату і автономно працюючого ежекторного пристрою, що визначається наявністю примусового відкачування вакуумним насосом. Визначено, що розподіл швидкостей у вихровій камері вихрової ежекторної ступені підпорядковується закону розподілу вільного і вимушеного вихорів. Закон розподілу вільного вихору відповідає степеневому закону розподілу швидкості.

Наведено результати розрахункового моделювання взаємодії потоків за допомогою програмного комплексу FlowVision. Отримано розподіл поля швидкостей і тиску в розрахункових перетинах проточної частини вихрової ежекторної ступені.

Проведено аналіз енергоефективності вакуумного агрегату на базі ексергетичної ефективності. Наведено методику розрахунку вакуумного агрегату для системи вакуумного охолодження водних розчинів.

Ключові слова: вихрова ежекторна ступінь, рідинно-кільцевий вакуумний насос, вакуумний агрегат, коефіцієнт ежекції.

АННОТАЦИЯ

Мелейчук С.С. Рабочий процесс и характеристики вихревой эжекторной ступени вакуумного агрегата. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.15 – вакуумная и компрессорная техника.– Сумский государственный университет, Сумы, 2007.

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований рабочего процесса вихревой эжекторной ступени вакуумного агрегата. Определено влияние геометрических параметров проточной части эжектора на его характеристики.

Основным содержанием работы является получение расчетного уравнения, что объединяет три режимных параметра вихревой эжекторной ступени (степень расширения активного потока, степень сжатия пассивного потока, коэффициент эжекции) с геометрическими параметрами проточной части эжекторной ступени. Расчетная модель базируется на законе сохранения импульса в расчетных сечениях. Учет потери импульса, что обусловлен диссипационными процессами, выполняется путем введения коэффициентов, которые характеризуют уменьшение абсолютной скорости. Для течений, в которых вектор абсолютной скорости газа составляет некоторый угол с осью потока, используются так называемые сложные газодинамические функции. Главной особенностью вихревых эжекторов в отличие от прямоосных является неравномерность распределения скоростей и давлений по радиусу рассматриваемых сечений. Это обуславливает введение в расчетные зависимости среднеинтегральных величин газодинамических функций, импульсов потоков и их кинематических и динамических составляющих.

Показано существенное отличие в работе вихревой эжекторной ступени вакуумного агрегата и автономно работающего эжекторного устройства, которое состоит в наличии принудительной откачки потоков через предусмотренные конструкцией сопловые вводы или каналы. В частности, при работе вихревой эжекторной ступени в составе вакуумного агрегата отсутствует приосевая область неразрушаемого вихревого шнура, что имеет место при работе автономного эжектора.

Экспериментальной частью исследования являлось получение расходных характеристик компонентов вакуумного агрегата (вихревой эжекторной ступени и жидкостно-кольцевого вакуумного насоса) в зависимости от геометрического соотношения проточной части эжекторной ступени. Выявлено, что использование вихревой эжекторной ступени позволяет расширить диапазон работы вакуумного агрегата по давлению всасывания и по объемной производительности.

Моделирование взаимодействия потоков в проточной части вихревой эжекторной ступени производилось с помощью программного комплекса FlowVision. В результате проведенных исследований получены зависимости распределения тангенциальной и осевой составляющих

скорости взаимодействующих потоков в расчетных сечениях. Анализ результатов позволил подтвердить предположения, принятые при рассмотрении расчетной модели.

Представлена методика расчета характеристик вихревой эжекторной ступени на основании экспериментальных данных. Предложен степенной закон изменения скорости взаимодействующих потоков. Путем введения показателя степени в закон изменения скорости удалось достичь удовлетворительных результатов сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей.

Проведен эксергетический анализ энергоэффективности расчетных схем, таких, как: вакуумный агрегат в целом, жидкостно-кольцевой вакуумный насос и вихревая эжекторная ступень. Выявлено, что вакуумный агрегат с вихревой эжекторной ступенью имеет большее значение эксергетического коэффициента полезного действия, чем жидкостно-кольцевой вакуумный насос без эжектора.

Представлено методику расчета системы вакуумного охлаждения водных растворов, которая позволяет определять минимальную объемную производительность вакуумного насоса, а также определять время охлаждения раствора.

Ключевые слова: вихревая эжекторная ступень, жидкостно-кольцевой вакуумный насос, вакуумный агрегат, коэффициент эжекции.

ABSTRACT

Meleychuk S.S. Working process and characteristics of vortex ejection stage for vacuum pump unit. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science in speciality 05.05.15 – vacuum and compressor machinery. – Sumy State University, Sumy, 2007.

Results of the working process and performance curves for vortex ejection stage of vacuum pump unit are given in this dissertation paper. It is determined an influence of the ejector internals geometry parameters on its characteristics.

The main task of the study is to obtain design dependences of the components distribution in speed field of interacting flows on the base of the experimental data processing. It is demonstrated basic distinction in operation of vortex ejection stage of vacuum pump unit and autonomous operating ejector unit.

Experimental part of study was shown the reception of expense features of components of vacuum unit (the of vortex ejection stage and liquid ring vacuum pump vacuum pump) depending on geometric correlation of running part an of vortex ejection stage. It is revealed that use an of vortex ejection stage allows to increase the range of functioning (working) the vacuum unit on pressure of suction and on three-dementional capacity.

Exergy analysis energy efficiency accounting schemes is organized.

It is presented strategy of calculation of system of vacuum cooling the water solutions which allows to define the minimum volume productivity of the vacuum pump, and also to define time of cooling of a solution.

Key words: vortex ejection stage, liquid ring vacuum pump, vacuum pump unit, ejection efficiency.

Підп. до друку 27.04.2007 р.
Замовлення №417
Наклад 100 прим.

Папір офс.
Друк офс.
Ум.друк.арк.1,1.

Формат 60×84/16.
Обл.-вид. арк. 0,9.

Видавництво СумДУ. Свідоцтво ДК№2365 від 08.12.2005р.
40007, м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2.
Друкарня СумДУ. 40007, м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2.