

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛЕВЧЕНКО Дмитро Олексійович



УДК 621.524:533.697.5

**ВДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВИХРОВОЇ
ЕЖЕКТОРНОЇ СТУПЕНІ У СКЛАДІ РІДИННО-КІЛЬЦЕВОГО
ВАКУУМ-НАСОСА**

05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи
кондиціонування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті (СумДУ)

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
АРСЕНЬЄВ В'ячеслав Михайлович,
Сумський державний університет,
професор кафедри технічної теплофізики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
ГНЕСІН Віталій Ісайович,
Інститут проблем машинобудування
НАН України,
завідуючий відділом нестационарної
газодинаміки та аеропружності;

кандидат технічних наук, доцент
БУДАНОВ Василь Олексійович,
Одеська державна академія холоду,
директор інституту низькотемпературної
техніки та технології;
доцент кафедри компресорів і пневмоагрегатів

Захист відбудеться «16» грудня 2011 р. о 13³⁰ 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 в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського–Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «16» листопада 2011 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**



Савченко Є. М. .

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час розвиток підприємств харчової, хімічної та металургійної промисловості, енергетики пов'язаний, як з економічними, так і з технічними проблемами, вирішення яких передбачає перехід до енерго- і ресурсозберігаючих технологій.

Розвиток ряду галузей має на увазі підвищення вимог до якості середовища, у якому створюється вакуум. Тому однією з найбільш актуальних завдань є повна або часткова заміна механічних форвакуумних насосів, котрі активно використовують різні мастила, які погіршують ступінь чистоти вакуумованого середовища.

Серед систем безмасляної відкачки в особливу групу варто виділити рідинно-кільцеві машини (РКМ), зокрема рідинно-кільцеві вакуум-насоси (РКВН). Цей тип машин цілком відповідає високим вимогам до чистоти вакууму. Крім того, вони конструктивно прості, надійні в експлуатації, відрізняються низьким рівнем шуму і вібрації при роботі. Однак, у РКВН є ряд недоліків: відносно низький ККД через витрати потужності на обертання рідинного кільця та високий граничний залишковий тиск, який регламентується тиском насичених парів робочої рідини.

Проблема зменшення тиску всмоктування РКВН вирішується декількома способами: використанням двоступінчатих одновальних РКВН; послідовним включенням одноступінчатих РКВН; агрегування РКВН із ежектором.

Застосування перших двох методів підвищення вакууму веде до збільшення споживаної потужності, металоємності, питомої витрати води, питомої площі установки й, природно, до підвищення капітальних витрат.

Найбільш технологічно й економічно вигідним рішенням є агрегування РКВН із ежектором. У якості передувімкненої ступені для вакуумного агрегату можуть бути використані прямоструменеві та вихрові ежектори. Існуючі експериментальні й теоретичні дослідження в основному стосуються РКВН, у яких передувімкненою ступенню є прямоструменеві, одно- і двоступінчасті ежектори. Такі дослідження проводилися в НВО «Кріогенмаш», СМНВО імені Фрунзе, КДТУ ім. Кірова (КХТІ); у роботах Л.Т. Караганова, І.А. Райзмана, А.І. Рудакова, С.С. Триполко й ін.

Однак, на даний момент недостатньо досліджена гідродинаміка течії газу у вихровій ежекторній ступені (ВЕС), відсутні експериментально підтверджені методики розрахунку передувімкненої ВЕС, а також не визначений діапазон обґрунтованого застосування ВЕС, у порівнянні із прямоструменевою ежекторною ступінню (ПЕС).

Таким чином, роботи з удосконалювання робочого процесу ВЕС, одержання експериментальних характеристик і їхнє використання при створенні інженерної методики розрахунку ВЕС вакуумного агрегату є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Наукові розробки реалізовувалися при виконанні НДР по Гранту Президента України для

підтримки наукових досліджень молодих учених на тему GP/F27/0016 «Дослідження й розробка вакуумного агрегату на базі рідинно–кільцевого вакуум–насоса з вихровим ежектором» № 0110U003074, держбюджетної НДР «Розробка бінарної паротурбінної установки (міні–тец) для ресурсозберігаючого електро– і теплопостачання підприємств України» (замовник – Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, № 0108U000672), а також НДР на тему «Дослідження робочих процесів енергетичних машин», №0110U004210.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення зв'язку геометрії проточної частини вихрової ежекторної ступені з режимними характеристиками вакуумного агрегату на базі рідинно–кільцевого вакуум–насоса в межах її ефективного застосування.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити область ефективного застосування різних типів ежекторних ступеней за результатами порівняння експериментальних характеристик вакуумних агрегатів із передувімкненими вихровою і прямоструменевою ежекторними ступенями;

– створити математичну модель робочого процесу вихрової ежекторної ступені з урахуванням динаміки газових потоків у її проточній частині;

– дослідити закономірності розподілу швидкостей газового потоку в характерних перетинах проточної частини вихрової ежекторної ступені і встановити зв'язок компонентів вектора абсолютної швидкості з геометрією проточної частини ВЕС;

– дослідити вплив геометрії проточної частини вихрової ежекторної ступені на режимні характеристики вакуумного агрегату;

– на основі теоретичних і експериментальних досліджень розробити методичку розрахунку вихрової ежекторної ступені для проектування вакуумних агрегатів на базі рідинно–кільцевих вакуум–насосів.

Об'єкт дослідження – робочий процес вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату на базі РКВН.

Предмет дослідження – вихрова ежекторна ступінь вакуумного агрегату.

Методи дослідження. Поставлені задачі дослідження вирішувалися за допомогою розрахунково–аналітичного методу, математичного моделювання, фізичного моделювання, а також шляхом зіставлення результатів розрахункових характеристик з експериментальними даними.

Розрахунково–аналітичний метод базується на класичних законах термодинаміки і газодинаміки. З його допомогою виконаний аналіз існуючих моделей взаємодії вихрових потоків і сформульовані основні положення математичної моделі течії газу в проточній частині ВЕС.

Математичне моделювання взаємодії потоків газу в проточній частині ВЕС при заданих режимних параметрах вакуумного агрегату і геометрії проточної частини реалізовувалося мовою Visual Basic у середовищі Microsoft Excel.

Фізичний експеримент складався з: експериментального дослідження витратних і енергетичних характеристик вакуумного агрегату із передувімкненими ежекторними ступенями різних типів (із замкнутим і не

замкнутим циклом водопостачання); індикації полів тиску (повного й статичного) у характерних перетинах проточної частини ВЕС, а також визначення в них кутів потоку; дослідження впливу геометрії проточної частини на витратні та енергетичні характеристики вакуумного агрегату.

Вірогідність отриманих експериментальних даних забезпечувалася використанням загальноновизнаних на практиці методик проведення відповідних експериментів, а також припустимою погрішністю виміру фізичних параметрів. Вірогідність отриманих у роботі теоретичних результатів оцінювалася шляхом порівняння їх з експериментальними даними.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше проведені порівняння режимних характеристик ежекторних ступеней вихрового й прямоструменевого типів у складі вакуумного агрегату на базі РКВН і визначені умови їхнього ефективного застосування;

- вперше експериментально досліджена структура потоку газу для різної геометрії проточної частини ВЕС і на різних режимах роботи вакуумного агрегату;

- експериментально визначено вплив відносних геометричних параметрів вихрової камери ВЕС на режимні характеристики вакуумного агрегату на базі РКВН;

- вперше експериментально встановлена закономірність розподілу швидкостей потоків газу в характерних перетинах ВЕС, проаналізований характер еволюції потоку по тракту вихрової камери та отримані розрахункові рівняння для знаходження середньоінтегральних параметрів потоку;

- визначені коефіцієнти кореляції ψ_{zm} , ψ_{Π} , ψ_A , які враховують дисипативні явища при течії та змішуванні потоків і входять у газодинамічну модель взаємодії потоків;

- розроблено математичну модель робочого процесу в проточній частині ВЕС вакуумного агрегату з уточненням на базі експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена інженерна методика розрахунку ВЕС, оптимальної, з погляду досягнення максимального коефіцієнта ежекції або досяжного рівня вакууму;

- створено експериментальний стенд для дослідження режимних характеристик вакуумних агрегатів на базі РКВН із передувімкненими ежекторними ступенями різних типів;

- визначені області раціонального застосування ежекторних ступенів різних типів;

- дані практичні рекомендації з вибору основних геометричних параметрів ВЕС, що забезпечують необхідні режимні характеристики вакуумного агрегату;

- результати дисертаційної роботи впроваджені в ПАО «НПАО Вндікомпресормаш» і використовуються для розрахунку передувімкнених ежекторних ступеней вакуумних агрегатів на базі РКВН; а також впроваджені в навчальний процес на факультеті технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету для студентів спеціальності 05060405 «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка», що підтверджується відповідними актами.

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

[2] – створення програмного продукту й проведення розрахунків щодо визначення оптимальних геометричних розмірів вихрового ежектора; [3] – проектування ежектора, експериментальне дослідження режимних характеристик вакуумного агрегату із передувімкненою ВЕС та аналіз отриманих результатів; [4] – огляд існуючих напрямків використання беззмашувальних систем відкачки, брав участь в аналізі результатів і формулюванні висновків; [5] – проведення експериментальних досліджень вакуумних агрегатів із передувімкненими ежекторними ступенями різних типів і різної геометрії проточної частини, аналіз отриманих результатів; брав участь у формулюванні висновків.

Апробація роботи. Основні положення й результати дисертації доповідалися й обговорювалися на: 6-й, 7-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології» в 2009 й 2011 роках (м. Одеса); Міжнародній науково-технічній конференції «Використання пневматичної енергії й устаткування для її одержання в гірничодобувній галузі» (м. Суми, 2008 р.); XI Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка й пневматика» (м. Мелітополь, 2010 м.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми техніки й технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу й торгівлі» (м. Харків, 2010 р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів СумДУ (2007, 2008 роки).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 5 наукових праць у спеціалізованих виданнях, що входять до переліку наукових спеціалізованих видань України, у яких можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт. Матеріали дисертаційної роботи використовувалися також у звітах НДР за Грантом Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на тему GP/F27/0016 «Дослідження й розробка вакуумного агрегату на базі рідинно-кільцевого вакуум-насоса з вихровим ежектором» (№ 0110U003074).

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складається з 183 сторінок, у тому числі 69 малюнків, 11 таблиць, бібліографія з 209 джерел на 21 сторінці, 1 додаток на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність удосконалення робочого процесу, а також проведення дослідження параметрів потоку газу в проточній частині ВЕС. Зазначено на необхідність розробки методики розрахунку геометричних параметрів проточної частини ежекторної ступені з використанням експериментально підтверджених залежностей розподілу поля швидкостей у характерних перетинах вихрової ежекторної ступені. Сформульовано мету й

задачі дослідження, дається 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 робіт з дослідження робочого процесу ежекторних пристроїв і наведений аналіз області використання вихрових апаратів. Розглянуто основні конструктивні і геометричні фактори, які впливають на ефективність роботи вихрового ежектора.

У роботі звертається увага на те, що існуючі експериментальні й теоретичні дослідження загалом стосуються РКВН, у яких передувімкненим ступенем є прямоструменеві, одно– і двоступінчасті ежектори.

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що практично всі проведені дослідження вихрових апаратів, за винятком робіт С.С. Мелейчука і В.М. Арсеньєва, проводилися відносно робочого процесу вихрових труб та автономно працюючих ежекторів (Меркулов А.П., Дубінський М.Г., Пиралішвілі Ш.А., Черниш М.К., Спифанова В.И., Мартинов А.В., Мартиновський В.С., Бродянский В.М., Волов В.Т. й ін.). У математичній моделі, складеної С.С. Мелейчуком, відсутній газодинамічний опис еволюції вихрового потоку в характерних перетинах ежектора. Також є очевидними недоліки застосування циліндричної прийомної камери,– такі як підвищений опір торця стінки проставки й порівняно швидке «загасання» енергії вихору.

У першому розділі формулюється мета й задачі дослідження.

У другому розділі представлені основні положення математичної моделі взаємодії потоків.

Врахування збільшення ентропії, зумовленого дисипативними проявами (тертя, змішання, нерівномірність і т.п.) виконується шляхом введення коефіцієнтів $\psi_A, \psi_{II}, \psi_{zm}$, що характеризують зменшення абсолютної швидкості. Втрати повного тиску розглядаються через відповідні коефіцієнти σ . Врахування неізоентропності процесу течії в соплових апаратах виражається через ізоентропний ККД η_s або коефіцієнт швидкості соплового апарату ϕ . Для течій, у яких вектор абсолютної швидкості газу становить деякий кут β з віссю потоку та з урахуванням кута α (див. рис. 1), складні газодинамічні функції використовуються в їхньому узагальненому вигляді $q(\lambda, \beta), q(\lambda, \alpha, \beta), Z(\lambda, \beta), Z(\lambda, \alpha, \beta), f(\lambda, \beta), f(\lambda, \alpha, \beta)$. При розрахунку імпульсу потоку нерівномірність розподілу швидкостей і тисків по радіусу розглянутих перетинів замінюється середньоінтегральними величинами $\hat{I}, \hat{q}, \hat{Z}, \hat{f}, \hat{\lambda}$; де надрядковий індекс « $\hat{\quad}$ » позначає осереднення параметра по площі перетину.

Основні допущення й обмеження: для вакуумного режиму роботи робоче середовище розглядається в ідеально–газовому наближенні; потік у всіх порожнинах ВЕС – осесиметричний; переміщення потоків в осьовому напрямку відбувається у всьому перетині вихрової камери і патрубка дифузора (відсутня область вихрового шнура, що не руйнується) ; відсутній зворотний осьовий плин газу; пасивний потік підводить без закручення $\beta_{2II} = 0$; змішання потоків

починається з перетину II (рис. 1) на поверхні течії з радіусом r_2 і проявляється в передачі моменту кількості руху від активного потоку до пасивного; кут між осью й витратною складовими вектора абсолютної швидкості дорівнює середньому куту конусності вихрової камери α для відповідного перетину.

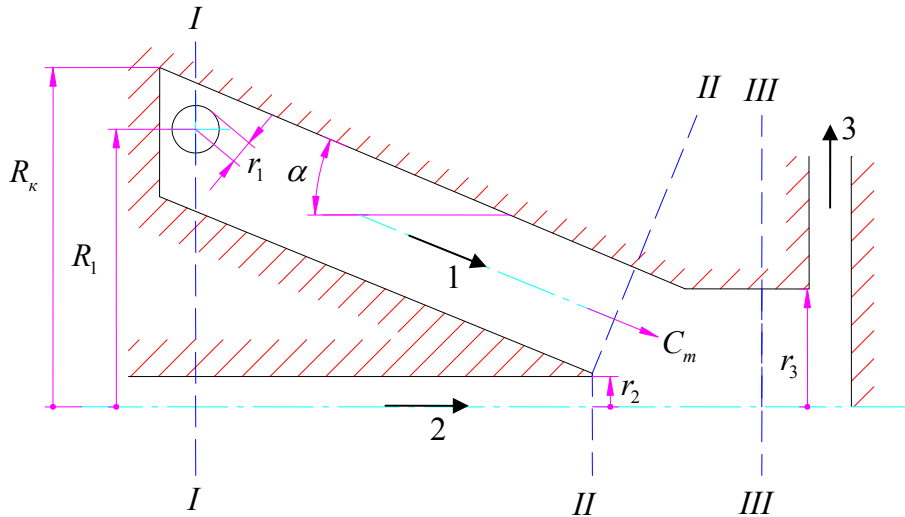


Рисунок 1 – Розрахункова схема вихрової ежекторної ступені

I, II, III – характерні розрахункові перетини вихрової камери: I – вихід активного потоку у вихрову камеру, II – вихід активного й пасивного потоків у зону змішування, III – вхід змішаного потоку в патрубок осерядіального дифузора; 1, 2, 3 – напрямки плинину газових потоків – активного, пасивного та змішаного відповідно; C_m – витратна складова вектора абсолютної швидкості активного потоку в кільцевому перетині конічної вихрової камери α ; – середній кут розчину конуса вихрової камери; R_1 – відстань від осі ежектора до осі активного сопла; R_k – радіус вихрової камери; r_1 – радіус вихідного перетину сопла активного потоку; r_2 – радіус вихідного перетину сопла пасивного потоку; r_3 – радіус циліндричної камери змішування.

Математична модель ВЕС базується на використанні закону збереження імпульсу потоку в межах перетинів II і III. У перетині II розглядається сума імпульсів активного й пасивного потоків, у перетині III потоки та їх імпульси не розділяються. Розрахункова схема вихрової ежекторної ступені представлена на рис. 1. Розташування характерних перетинів, використовуваних при виводі рівняння для імпульсу потоку, зручно визначати за допомогою відносної довжини \bar{l} й відносного радіуса \bar{r} вихрової камери:

$$\bar{l} = \frac{l_i}{L} \quad \bar{r} = \frac{r_i}{R_1}, \quad \frac{l}{r_n} = \text{ctg} \alpha$$

де L – довжина вихрової камери (відстань від торця вихрової камери з боку введення активного потоку до вихідного перетину камери змішування); l_i – відстань від торця вихрової камери з боку введення активного потоку до розглянутого i -го перетину; r_i – відстань від осі симетрії вихрового ежектора до поточної точки траверсування у i -му перетині; R_1 – відстань від осі сопла пасивного потоку до осі сопла активного; l – довжина сопла пасивного потоку

від його зрізу до глухої кришки вихрового ежектора; r_n – радіус зовнішньої поверхні сопла пасивного потоку з боку його кріплення до глухої кришки вихрового ежектора.

Рівняння збереження імпульсу потоку з врахуванням дисипації енергії має вигляд:

$$\hat{I}(\psi_{zm} \cdot \lambda_{III}, \beta_{III}) = \hat{I}(\psi_A \cdot \lambda_{IIA}, \beta_{IIA}, \alpha) + \hat{I}(\psi_{II} \cdot \lambda_{III}) \quad (1)$$

Врахування тривимірного характеру течії газу здійснюється за рахунок введення параметра Y – коефіцієнта врахування конусності вихрової камери, який дорівнює:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \beta} + tg^2 \alpha} \quad \text{або} \quad Y = \sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}, \quad \text{при цьому } Y > 1 \quad (2)$$

Беручи до уваги допущення про те, що пасивний потік підводиться без закрутки, а так само те, що в циліндричній камері змішування (перетин III) кут $\alpha = 0$, а кут β може змінюватися в межах від 0 до $\frac{\pi}{2}$, імпульс відповідних потоків із введенням газодинамічних функцій (ГДФ) записується у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \hat{I}_{III} &= P_{0II} \cdot F_{III} \cdot \hat{f}(\lambda_{III}), & \text{при } \beta_{III} = 0 \text{ і } \alpha = 0 \\ \hat{I}_{III} &= P_{0III} \cdot F_{III} \cdot \hat{f}(\lambda_{III}(\beta_{III})), & \text{при } 0 < \beta_{III} < \frac{\pi}{2} \text{ і } \alpha = 0 \\ \hat{I}_{IIA} &= P_{0A} \cdot F_{IIA} \cdot \hat{f}(\lambda_{IIA}(\alpha, \beta_{IIA})) & \text{при } 0 < \beta_{IIA} < \frac{\pi}{2} \text{ і } \alpha \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Перетворення рівняння (1) приводить до основних рівнянь робочого процесу: коефіцієнта ежекції U і ступеня підвищення тиску пасивного потоку ε :

$$U \sqrt{\theta} = \frac{\hat{Z}(\psi_A \cdot \lambda_{IIA}(\beta_{IIA}, \alpha)) - \hat{Z}(\psi_{zm} \cdot \lambda_{III}(\beta_{III}))}{\hat{Z}(\psi_{zm} \cdot \lambda_{III}(\beta_{III})) - \hat{Z}(\psi_{II} \cdot \lambda_{III})} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{де } \hat{Z}(\lambda_{III}) &= \hat{\lambda}_{III} + \frac{1}{\hat{\lambda}_{III}}, & \text{при } \beta_{III} = 0 \text{ і } \alpha = 0 \\ \hat{Z}(\lambda_{III}, \beta_{III}) &= \frac{1}{\cos \hat{\beta}_{III}} \left[\left(\frac{2k}{k+1} \cos^2 \hat{\beta}_{III} - \frac{k-1}{k+1} \right) \hat{\lambda}_{III} + \frac{1}{\hat{\lambda}_{III}} \right], & \text{при } 0 < \beta_{III} < \frac{\pi}{2} \text{ і } \alpha = 0 \\ \hat{Z}(\lambda_{IIA}, \alpha, \beta_{IIA}) &= \hat{Y} \cdot \cos \alpha \cdot \left[\hat{\lambda}_{IIA} \cdot \left(\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{\hat{\lambda}_{IIA}}{\hat{Y}^2 \cdot \cos^2 \alpha} - \frac{k-1}{k+1} \right) + \frac{1}{\hat{\lambda}_{IIA}} \right] \end{aligned} \right\}$$

– складні газодинамічні функції (ГДФ) для пасивного, змішаного й активного потоків відповідно; $\theta = \frac{R_{II} T_{0II}}{R_A T_{0A}}$ – відношення добутків газових постійних і температур гальмування пасивного й активного потоків; k – показник ізоентропи для робочого середовища;

$$\varepsilon = \sigma_{III} \cdot \frac{\Pi \cdot F_{IIA} \cdot \hat{f}(\lambda_{IIA}, \alpha, \beta_{IIA}) + F_{III} \cdot \hat{f}(\lambda_{III})}{F_{III} \cdot \hat{f}(\lambda_{III}, \beta_{III})}, \quad (5)$$

де $\Pi = P_{0A} / P_{0II}$ – ступінь розширення активного потоку

Для узгодження (4) і (5) введено ще одне рівняння (6), що зв'язує всі три режимних параметри: ступінь розширення активного потоку Π , коефіцієнт ежекції U й ступінь підвищення тиску пасивного потоку ε з геометрією проточної частини ВЕС:

$$\tilde{q}_3 = \Pi \cdot \frac{\mu \cdot \sigma_{III}}{\varepsilon} \cdot (1 + U\sqrt{\theta}) \cdot \frac{N \cdot \bar{r}_1^2}{\bar{R}_k^2} \quad (6)$$

де $\tilde{q}_3 = \frac{\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \hat{\beta}_{III}}{\hat{q}(\lambda_{VI})}$ – співвідношення витратних газодинамічних функцій;

$\mu = \frac{F_{II}}{F_{III}}$ – відношення площ перетинів II й III; N – число соплових введень активного потоку.

Граничний режим, що визначає максимальний коефіцієнт ежекції настає за умови досягнення критичних параметрів пасивного потоку $q(\lambda_{III}) = 1$:

$$U_{\max} \sqrt{\theta} = \frac{A_3 - \frac{A_2 \cdot \tilde{q}_3}{\Pi}}{\hat{q}(\lambda_{III}) \cos \hat{\beta}_{III} - A_3}, \quad (7)$$

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

У третьому розділі представлена схема експериментального стенду по дослідженню характеристик вакуумного агрегату на базі РКВН із передувімкненими ежекторними ступенями різних типів, оцінка похибки вимірів, результати експериментальних досліджень.

У процесі експериментальних досліджень зміна геометрії проточної частини виконувалося шляхом застосування 9 сопел пасивного потоку з різними значеннями r_n й l .

Результати експериментального дослідження показані на рисунках 2 і 3.

Різним довжинам сопел пасивного потоку на графіках режимних характеристик відповідають позначення: \square – довге (довжина сопла пасивного потоку $l = 40,3$ мм); Δ – середнє (довжина сопла пасивного потоку $l = 26,8$ мм); \circ – коротке (довжина сопла пасивного потоку $l = 13,2$ мм). Кожному соплу з довжиною l відповідають три значення r_n (табл. 2 на ст.15).

Отримано експериментальні режимні характеристики ВЕС із різною геометрією проточної частини (рис.2.), у результаті аналізу яких можна зробити наступні висновки:

– геометрія проточної частини прийомної камери ВЕС значно впливає на енергетичну характеристику вакуумного агрегату. Підвищення гідравлічного опору при використанні коротких сопел пасивного потоку спричиняє додаткові витрати потужності на забезпечення рівної об'ємної продуктивності (рис. 2г) або тиску всмоктування;

– незважаючи на високі значення коефіцієнта ежекції для коротких сопел, їхнє застосування у ВЕС не доцільно, тому що об'ємна продуктивність такого вакуумного агрегату або нижче (рис. 2а), або незначно перевищує (при інших

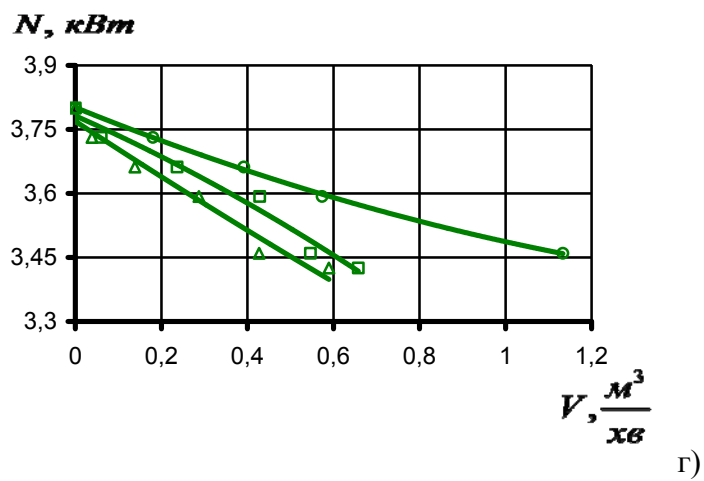
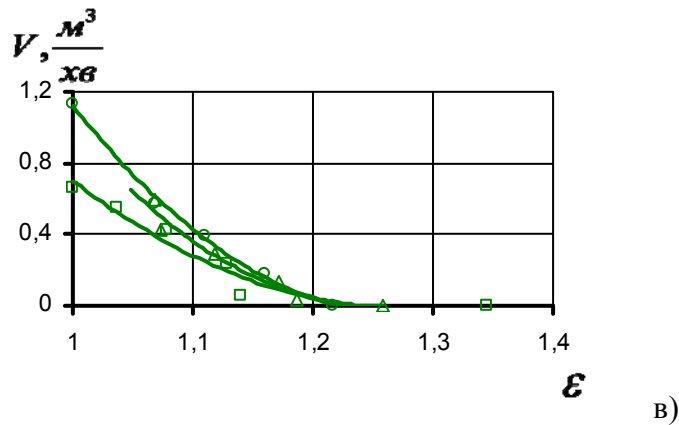
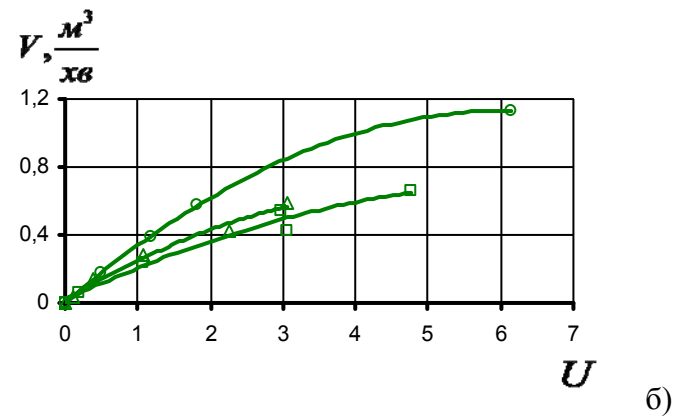
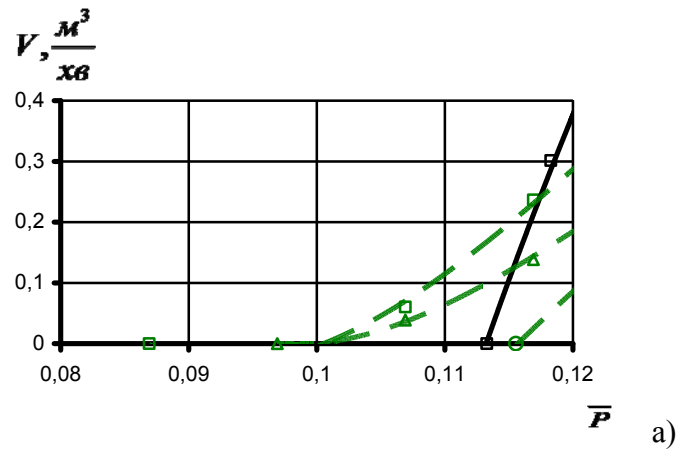


Рисунок 2 – Режимні характеристики вакуумного агрегату з ВЕС для сопел пасивного потоку різної довжини із зовнішнім діаметром $D_n = 16,8$ мм

діаметрах сопел пасивного потоку D_n) об'ємну продуктивність неагрегованого РКВН в області розглянутих тисків.

Аналіз усіх отриманих характеристик свідчить, що використання ВЕС дозволяє розширити діапазон роботи вакуумного агрегату по тиску всмоктування та по об'ємній продуктивності, а саме: збільшується рівень досяжного вакууму на 5–8,5% залежно від геометричних співвідношень проточної частини.

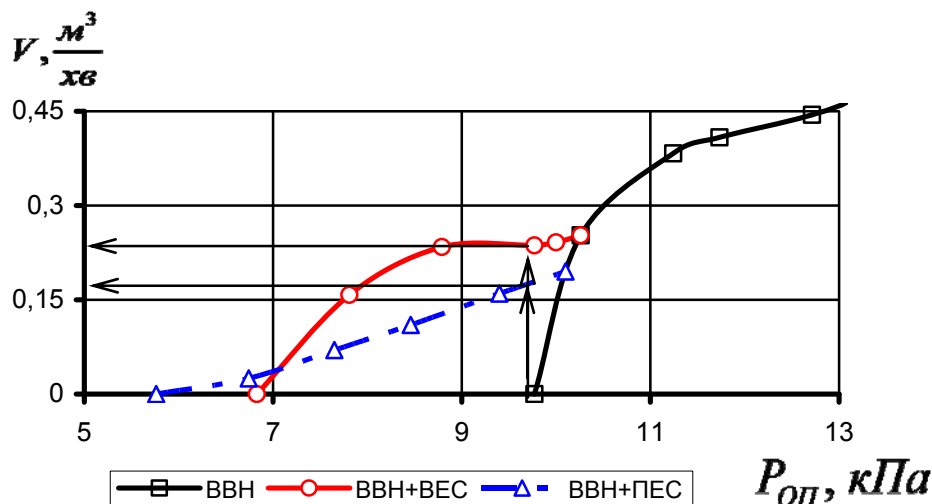


Рисунок 3 – Витратні характеристики вакуумного агрегату із передувімкненими ВЕС і ПЕС на нерозрахунковому режимі роботи ВВН–1,5 (замкнутий цикл водопостачання) при середній температурі води на лінії всмоктування $T_w=28^\circ\text{C}$

За результатами експериментального порівняння витратних й енергетичних характеристик передувімкнених ежекторних ступеней різних типів можна зробити висновок, що прямоструменева ежекторна ступінь (ПЕС) забезпечує досягнення більш низького тиску всмоктування пасивного потоку в порівнянні з ВЕС, але при цьому продуктивність вакуумного агрегату з ПЕС у діапазоні тиску всмоктування 7–10 кПа нижче в порівнянні з ВЕС. Так, при тиску пасивного потоку на всмоктуванні 8,7 кПа продуктивність вакуумного агрегату з ВЕС на 50% більше, ніж у РКВН із ПЕС (рис. 3).

Для визначення середньоінтегральних значень ГДФ у характерних перетинах ВЕС необхідно знати закономірність розподілу поля швидкостей у проточній частині ВЕС. Для цього було проведено експериментальне дослідження структури потоку в цих перетинах ВЕС, окремі результати якого представлені на рис.4.

Як можна бачити із графіків (рис. 4), зміна кутових характеристик потоку по тракту вихрової камери значною мірою залежить від режиму роботи вакуумного агрегату. Так, для режимів при рівні вакууму пасивного потоку $B \geq 87\%$ на зрізі сопла пасивного потоку формується концентрований вихор з вираженим градієнтом кутових характеристик потоку по відносному радіусу вихрової камери, і, навпаки, при $B \leq 87\%$ цей вихор вироджується в струмінь,

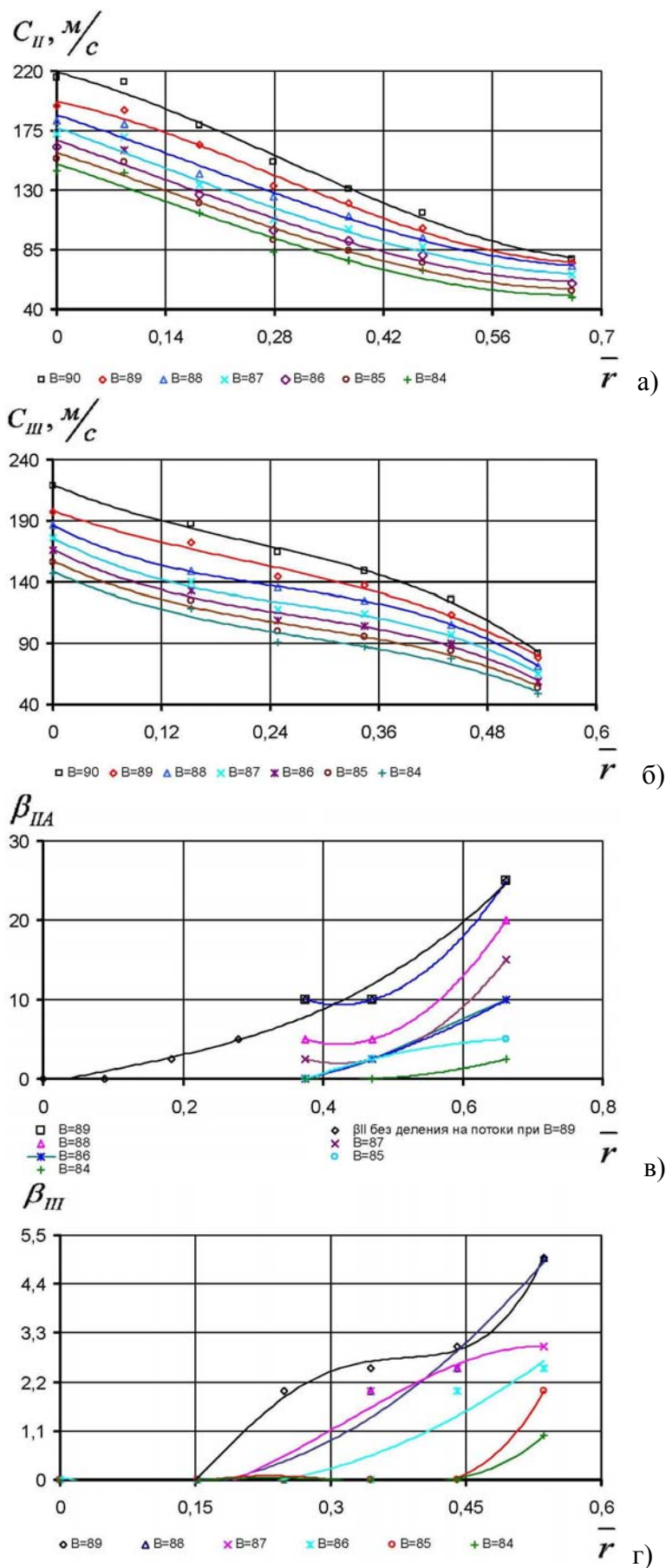


Рисунок 4 – Залежність абсолютної швидкості та кутових характеристик потоку в характерних перетинах ВЕС.

що має дуже слабку ежективну здатність.

Приведений аналіз похибок вимірювань. Величина відносної похибки вимірювання продуктивності агрегату не перевищує 4%, потужності – не перевищує 2%.

У четвертому розділі приводяться результати порівняння даних експериментального дослідження, представлених у попередньому розділі, із чисельним експериментом, проведеним на базі математичної моделі, описаної в другому розділі даної роботи. Режими роботи вакуумного агрегату із передувімкненою ежекторною ступінню умовно розділяються за рівнем вакууму пасивного потоку B , %.

Знаходження середньоінтегральних значень параметрів потоку можливо лише у тому випадку, якщо відомий закон розподілу полів швидкостей і просторових кутів складових вектора абсолютної швидкості в зазначених перетинах, тому з цією метою за отриманими даними експериментального дослідження структури потоку всередині ВЕС побудовані регресійні залежності, точність яких прийнятна для практичного використання.

На рис.5 представлено розподіл значень складних газодинамічних функцій по відносному радіусу вихрової камери, а також їх залежність від приведеної абсолютної швидкості у характерних перетинах проточної частини ВЕС на різних режимах роботи вакуумного агрегату.

Для врахування приросту ентропії, обумовленого дисипативними проявами, шляхом зворотного рішення системи основних рівнянь ВЕС були знайдені коефіцієнти кореляції ψ , введення яких встановлює рівність відповідним режимам роботи вакуумного агрегату з ВЕС. При цьому розрахункові і експериментальні криві мають мінімальну розбіжність, що можна бачити на рис.6.

Коефіцієнти кореляції ψ , які по своїй суті є дисипативними функціями та характеризують ступінь переходу енергії впорядкованого руху в енергію неупорядкованого руху, в остаточному підсумку, у теплову. Значення ψ для відповідних газових потоків у ВЕС на різних режимах представлені в табл. 1.

Відносну дисипацію енергії взаємодіючих потоків можна виразити співвідношенням $\bar{\psi} = \frac{\psi_A - \psi_{зм}}{\psi_{II} - \psi_{зм}}$, величина якої змінюється в межах від 0,3 до 0,7

для режимів, що мають практичне значення (по тиску всмоктування й об'ємної продуктивності), роботи вакуумного агрегату із передувімкненою ВЕС. Звідси випливає важливий висновок, що ψ_A й ψ_{II} не можуть одночасно приймати

значення рівне одиниці. З огляду на те, що $\psi_{см} \neq 1$, а вираз $\frac{\psi_A - \psi_{зм}}{\psi_{II} - \psi_{зм}}$ записаний

щодо потоку змішання й враховує дисипацію енергії активного і пасивного потоків при їхньому плинні і взаємодії у вихровій камері, то він за своєю суттю визначає максимальне значення параметра $\psi_{зм}$ для відповідного режиму. Таким чином, приймаючи $\psi_{зм}^{\max} = \bar{\psi}$ та задаючись $\psi_{II} = 1$ визначаємо досягнути величину ψ_A^{\max} на зрізі сопла активного потоку, що лежить у межах $0,51 \div 0,91$.

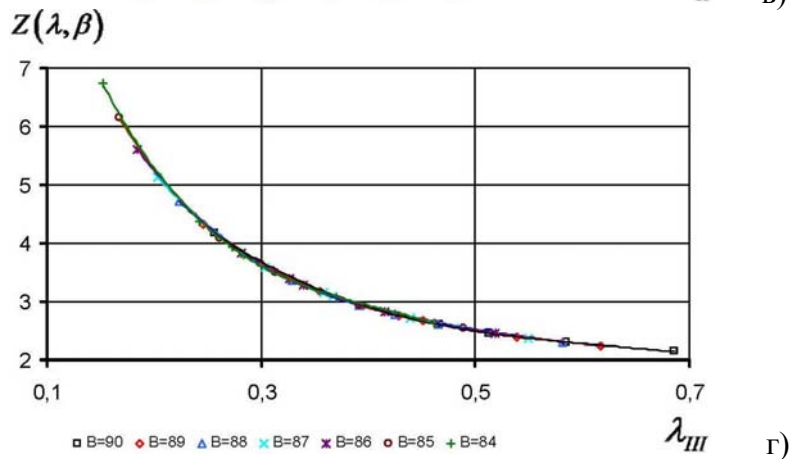
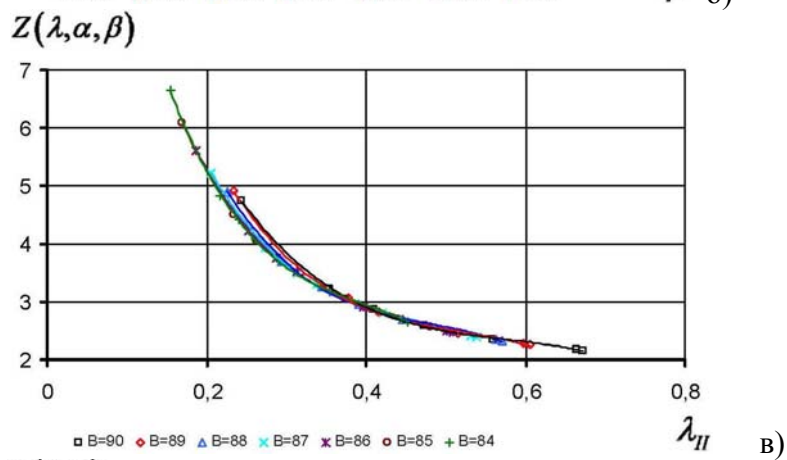
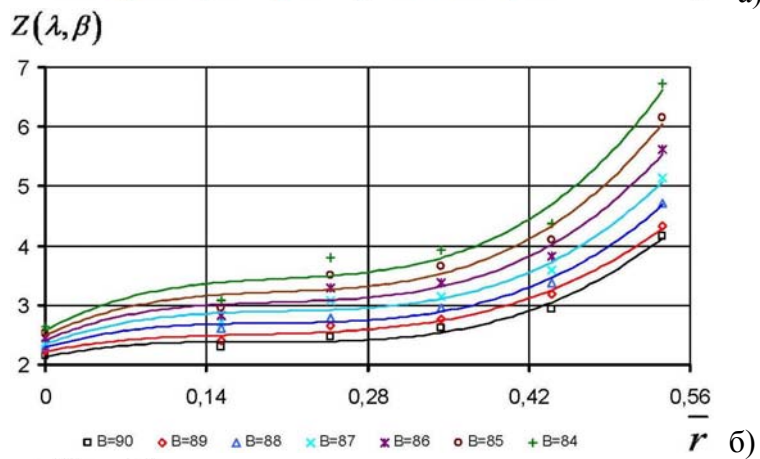
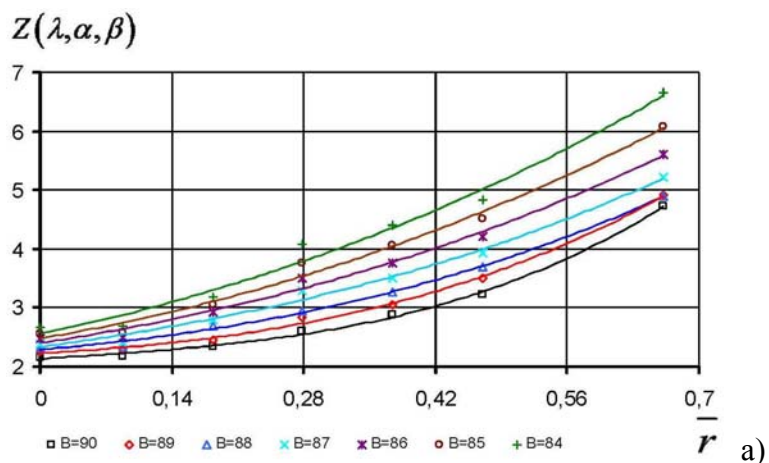


Рисунок 5 – Залежність складних газодинамічних функцій від відносного радіуса і приведеної швидкості для характерних перетинів ВЕС

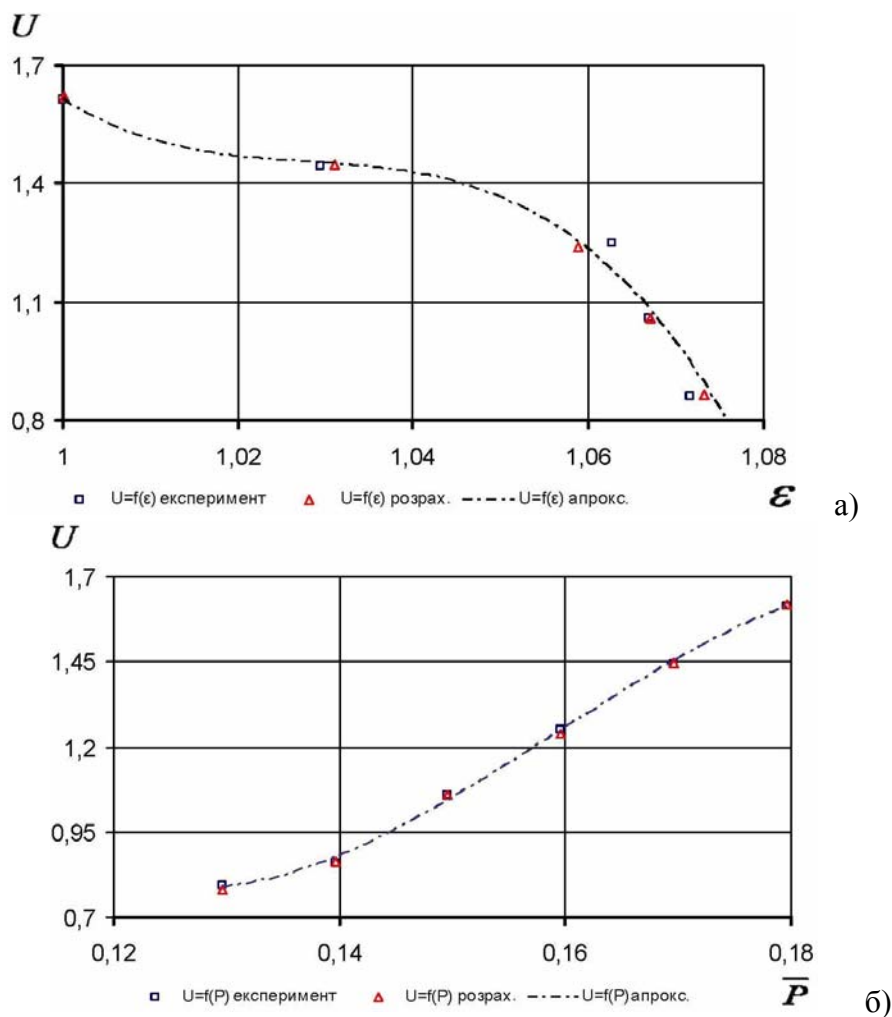


Рисунок 6 – Результати порівняння основних режимних параметрів вакуумного агрегату отриманих у результаті експериментального дослідження із чисельним експериментом, проведеним з математичною моделлю робочого процесу ВЕС

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів кореляції та енергетичних параметрів потоку для вакуумного агрегату з ВЕС на різних режимах його роботи

Рівень вакууму пасивного потоку, \mathbf{B} %	89	88	87	86	85	84
U	0,782	0,864	1,057	1,238	1,446	1,619
ε	1,079	1,073	1,067	1,058	1,031	1,0002
ψ_A	0,84	0,68	0,57	0,5	0,46	0,45
ψ_{II}	0,95	0,87	0,74	0,64	0,54	0,47
$\psi_{зм}$	0,68	0,6	0,54	0,48	0,44	0,42

Т. я. коефіцієнт швидкості соплового апарата φ також враховує нерівноважність процесу витікання і характеризує газодинамічну ефективність

сопла, то в інженерних розрахунках у наближенні можна прийняти $\varphi_A = \psi_A^{\max}$ й $\varphi_{зм} = \psi_{зм}^{\max}$.

При проектуванні ВЕС у складі вакуумного агрегату на базі РКВН для процесів вакуумування у якій-небудь технологічній системі виникають, як правило, два типи технічних завдань (ТЗ), залежно від вихідних даних:

а) Задані параметри P, T, R, k для всіх потоків, при цьому режимні характеристики неагреатованого РКВН вважаються відомими, тобто визначений $\dot{m}_{зм} = f(P_{зм})$. У цьому випадку основною вимогою до вакуумного агрегату є досягнення заданого тиску пасивного потоку при деякому значенні коефіцієнта ежекції U , а визначення оптимальної геометрії ВЕС виконується з метою досягти його максимального значення U_{\max} ;

б) Задані $P_{II}, P_A, \dot{m}_{II}$ і T, R, k для всіх потоків, тобто, крім регламентованого тиску всмоктування вакуумний агрегат повинен забезпечити встановлену масову витрату газу через сопло пасивного потоку. У такому випадку, шуканими є геометрія ВЕС і $P_{зм}, \dot{m}_{зм}$ по яких й виконується підбір РКВН.

Методика розрахунку ВЕС зводиться до наступних дій:

– використовуючи табл. 2 визначаємо робочу зону (залежно від Π) вакуумного агрегату з ВЕС і діапазон значень основного геометричного співвідношення вихрової камери l/r_n . При цьому кут розчину α вихрової камери необхідно привести до діапазону значень $0 \div 6^\circ$, у якому математична модель робочого процесу узагальнена за результатами експериментального дослідження. Це можна зробити, варіюючи величиною l/r_n , тому що $\frac{l}{r_n} = ctg \alpha$;

Таблиця 2 – Основні геометричні співвідношення вихрової камери ВЕС

Радіус r_n , мм	7,4			8,4			9,4		
Довжина l , мм	13,2	26,8	40,3	13,2	26,8	40,3	13,2	26,8	40,3
l/r_n	1,78	3,62	5,44	1,57	3,19	4,78	1,4	2,85	4,28
Π	5,7÷8,6	6,4÷10,3	7,3÷13	6,1÷8,7	7÷10,5	6÷11,7	6,6÷9,8	6,8÷14,6	7,4÷15,2

– задаємося величиною R_1 з урахуванням даних за результатами чисельного експерименту, максимально наближаючись (наскільки це можливо з технологічних міркувань) до r_n ;

– звертаючись до граничного режиму роботи ВЕС ($\lambda_{III} = 1$, $\hat{Z}(\lambda_{III}) = 2$, $\hat{C}_{III} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT, \sigma_{III} = 1$), залежно від типу технічного завдання, у першому наближенні знаходимо: для першого типу технічного завдання (а) – відносний радіус сопла пасивного потоку \bar{r}_2 з рівняння регресії для

відповідного перетину виду: $\widehat{C}_{III} = A \cdot \overline{r_2^3} - B \cdot \overline{r_2^2} + C \cdot \overline{r_2} + D$, де A, B, D – коефіцієнти; для другого (b) – відносний радіус камери змішання $\overline{r_3}$;

– використовуючи отримані значення, для (a) визначаємо \dot{m}_II , як масова витрата газу \dot{m} через перетин F для одномірного адіабатного потоку:

$$\dot{m} = \Omega \cdot F \cdot P_0 \cdot q(\lambda), \text{ де } \Omega = \frac{\sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}{\sqrt{R_0 \cdot T_0}} - \text{коефіцієнт; і знаходимо } U_{\max} \text{ й } \dot{m}_A.$$

Задаючись витратними газодинамічними функціями $q(\lambda_{U1})=1$ і $q(\lambda_{III})=1$, знаходимо наближені геометричні розміри сопел активного r_1 і змішаного r_3 потоків. Для розрахункового варіанта ТЗ (b), підставляючи $\overline{r_2}$ й $\overline{r_3}$ у відповідні рівняння регресії, знаходимо значення ε з використанням складних газодинамічних функцій (рівняння 5), при $\sigma=1$. Далі визначаємо тиск P_C , масова витрата змішаного потоку \dot{m}_{zm} й максимальний коефіцієнт ежекції U_{\max} ;

– подальший розрахунок для обох випадків полягає в підстановці геометричних розмірів, отриманих у першому наближенні, у регресійні рівняння, визначення компонентів газових потоків у перетині II й III, знаходженні в них кутових характеристик потоку й перерахування досяжного коефіцієнта ежекції з використанням газодинамічних функцій (рівняння 4) і врахуванням $\overline{\psi}$, φ_A^{\max} і φ_{zm}^{\max} . По отриманим параметрам потоків знаходимо уточнені значення основних геометричних розмірів ВЕС для обох випадків і підбираємо РКВН з необхідною витратною характеристикою (для випадку (b)).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково–технічне завдання вдосконалення робочого процесу вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату на базі рідинно–кільцевого вакуум–насоса.

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Визначено вплив геометрії ВЕС, зокрема основного геометричного параметра l/r_n , на режимні характеристики вакуумного агрегату на базі РКВН і надано практичні рекомендації щодо їх вибору задля забезпечення необхідного режиму роботи вакуумного агрегату.

2. За результатами експериментального дослідження течії газу в проточній частині ВЕС вперше встановлені закономірності розподілу швидкостей у характерних перетинах проточної частини ВЕС і визначений вплив параметрів потоку газу всередині ВЕС на режимні характеристики вакуумного агрегату на базі РКВН.

3. Розроблено математичну модель і методику розрахунку ВЕС, що на підставі кінематичної подоби потоків у прийомній камері, дозволяє узагальнити результати фізичного й математичного експериментів для вакуумних агрегатів на базі РКВН різної продуктивності від ВВН 0,75 до ВВН 6, у межах чисел

Рейнольдса $Re = (0,8 \div 13) \cdot 10^5$, Маху $M = 0,1 \div 0,65$ та Річардсона $Ri = (2 \div 14) \cdot 10^{-7}$, а також у межах таких відносних розмірів проточної частини: $\bar{l} = 0,02 \div 0,7$, $\bar{r}_{\text{вш}} = 0,58 \div 1$, $\bar{r}_1 = 0,071 \div 0,39$, $\bar{r}_2 = 0,42 \div 0,89$, $\bar{r}_3 = 0,63 \div 0,84$, $\alpha = 0 \div 6^\circ$.

4. Визначено відносний коефіцієнт кореляції $\bar{\psi} = \frac{\psi_A - \psi_{\text{см}}}{\psi_{\text{П}} - \psi_{\text{см}}} = 0,3 \div 0,7$, що враховує дисипативні явища при течії та змішуванні потоків у проточній частині для різних режимів роботи вакуумного агрегату.

5. Вперше проведені порівняння режимних характеристик ежекторних ступеней вихрового й прямоструменевого типів, на підставі яких можна зробити висновок, що прямоструменева ежекторна ступінь (ПЕС) забезпечує досягнення більш низького тиску всмоктування пасивного потоку в порівнянні з ВЕС, але при цьому продуктивність вакуумного агрегату з ПЕС у діапазоні тиску всмоктування 7–10 кПа на 30–50 % нижче в порівнянні з ВЕС. Таким чином, агрегування РКВН із ПЕС збільшує продуктивність вакуумного агрегату при більш високому вакуумі на всмоктуванні для РКВН із постійною режимною характеристикою. Однак застосування ВЕС для вакуумних агрегатів із замкненою системою водопостачання, у яких витратна характеристика змінна, більш доцільно, у порівнянні з ПЕС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА

1. Левченко Д.О. Экспериментальный стенд для сравнения предвключенных ежекторных ступеней различных типов на базе жидкостнокольцевого вакуум-насоса // Вісник СумДУ – № 10. – С. 143–153.

2. Левченко Д.А. Основные положения методики расчета вихровой ежекторной ступени вакуумного агрегата / В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2008. - № 2 (12). - С. 68–72.

3. Левченко Д.А. Агрегатирование ежектором водокольцевого вакуум-насоса / В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение Сумы, 2009. - № 13 (17). - С. 64–67.

4. Левченко Д.А. Применение воздушных ежекторных ступеней для бесшумных вакуум-насосов ротационного типа / В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко // Польша Motrol. Motorization and power industry in agriculture, Lublin 2009, tom 11. А. р. 46–53.

5. Левченко Д.А. Экспериментальные характеристики предвключенных воздушных ежекторных ступеней / В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.

АНОТАЦІЯ

Левченко Д.О. Вдосконалення робочого процесу вихрової ежекторної ступені у складі рідинно-кільцевого вакуум-насоса. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. - Сумський державний університет, Суми, 2011.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню робочого процесу вихрової ежекторної ступені, дослідженням режимних характеристик та параметрів потоку в проточній частині вихрового ежектора з метою вдосконалення її робочого процесу. У дисертаційній роботі наведені результати експериментального і теоретичного дослідження робочого процесу вихрової ежекторної ступені вакуумного агрегату.

Основним змістом роботи є визначення закономірності розподілу швидкостей газового потоку в характерних перерізах ВЕС, та підтвердження гіпотези щодо газодинамічної моделі взаємодії потоків. Виконано порівняння ежекторних пристроїв прямустріменевого та вихрового типів і визначено межі їх ефективного застосування. На базі закону збереження імпульсу в розрахункових перетинах ВЕС, з використанням складних газодинамічних функцій, були отримані основні рівняння робочого процесу ВЕС. Експериментально визначена закономірність розподілу швидкостей у вихровій камері вихрової ежекторної ступені з урахуванням трьохвимірного характеру течії газу. Отримані залежності складових вектора абсолютної швидкості газового потоку, та його основних кутових характеристик. На базі експериментальних даних побудовано рівняння регресії, які використовувалися при отриманні середньоінтегральних параметрів потоку в характерних перетинах вихрової камери. Розроблена інженерна методика розрахунку ВЕС.

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

АННОТАЦИЯ

Левченко Д.А. Совершенствования рабочего процесса вихревой ежекторной ступени в составе жидкостно-кольцевого вакуум-насоса. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 - холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. - Сумской государственной университет, Сумы, 2011.

Диссертация посвящена моделированию рабочих процессов вихревой ежекторной ступени, исследованию режимных характеристик и параметров потока в проточной части вихревого ежектора в целях совершенствования его рабочего процесса. В диссертационной работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования рабочего процесса вихревой ежекторной ступени вакуумного агрегата.

Основным содержанием работы является определение закономерности распределения скоростей газового потока в характерных сечениях ВЭС, и подтверждение гипотезы о газодинамической модели взаимодействия потоков. Также одним из направлений исследований было сравнение эжекторных устройств прямоструйного и вихревого типов и определение границ их эффективного применения. На базе математической модели закона сохранения импульса в расчетных сечениях ВЭС, с использованием сложных газодинамических функций, были получены основные уравнения рабочего процесса ВЭС. Экспериментально определена закономерность распределения скоростей в вихревой камере ВЭС с учетом трехмерного характера течения газа. Полученные зависимости составляющих вектора абсолютной скорости газового потока, и его основных угловых характеристик. По полученным экспериментальным данным построены уравнения регрессии, которые использовались при получении среднеинтегральных параметров потока в характерных сечениях вихревой камеры. Определены границы эффективного применения вихревой и прямоструйной эжекторной ступени в составе вакуумного агрегата на базе РКВН. Разработана инженерная методика расчета ВЭС.

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

ABSTRACT

Levchenko D.A. Improving the workflow of the vortex ejector stage in the liquid-ring vacuum pump. - Manuscript.

Dissertation for degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.14 - refrigerator, vacuum and air compressors, air-conditioning system. - Sumy State University, Sumy, 2011.

The dissertation is devoted to modeling workflow vortex ejector stage, the study of regime characteristics and flow parameters in the flow of the vortex ejector in order to improve its workflow. This thesis presents the results of experimental and theoretical study of the workflow stage ejector vacuum vortex unit. The influence of the basic geometric parameters of the ejector flow on the characteristics of a vacuum unit.

The main content of the work is to determine the patterns of distribution of velocities of the gas flow in specific sections of the VES, and confirmation of the hypothesis of gas-dynamic model of interaction flows. Also one of the areas of research was to compare the ejector device straightstream and vortex type and definition of the limits of their effective application. On the basis of physical and mathematical model of the law of conservation of momentum in the calculated cross sections of wind farms, using complex gas-dynamic functions were obtained by the basic equations of the workflow VES.

Experimentally determined pattern of distribution of velocities in the vortex chamber of the vortex ejector degree, taking into account the three-dimensional

nature of the gas flow. The resulting dependence vector components of absolute velocity of the gas flow, and its main angular features.

According to the experimental data are constructed regression equations that were used in obtaining mean integral flow parameters in the typical cross-sections of the vortex chamber.

The analysis of the interaction energy flows in the flow of wind farms with the flow of the interaction parameter, and setting the ratio of the energy flows.

The boundaries of the effective application of the vortex and straightstream ejector stage in the vacuum unit on the basis LRVP.

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