

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

УДК 637.125

Кваліфікаційна робота на правах  
рукопису

**СТАДНИК Володимир Петрович**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТАЦІЙНОГО ВАКУУМНОГО  
НАСОСА ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

---

(підпис)

---

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
к.т.н., Медведський О.В.

Житомир – 2020

## АНОТАЦІЯ

Стадник В. П. **Підвищення ефективності ротаційного вакуумного насоса доїльної установки.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020 р.

Кваліфікаційна робота спрямована на пошук шляхів покращення показників роботи пластинчастих вакуумних насосів, зокрема зменшення питомої енергоємності та зниження коливання вакуумметричного тиску у всмоктувальному патрубку. На основі виконаного аналізу наукових джерел встановлено шляхи удосконалення конструкції вакуумного насоса.

Кваліфікаційна робота вирішує наукове завдання підвищення ефективності пластинчастого вакуумного насоса шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи удосконаленої конструкції з подвійним принципом функціонування.

За результатами аналітичних досліджень встановлено раціональні геометричні параметри та технологічні режими роботи розробленого вакуумного насоса при реалізації яких на третину знижується питома енергоємність, порівняно із серійними вакуумними насосами.

**Ключові слова:** пластинчасто-роторний вакуумний насос, тиск, питома енергоємність, питома подача, геометрична продуктивність.

## ANNOTATION

Stadnyk V. P. **Improving the efficiency of a rotary vacuum pump of a milking machine.** – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2020.

Qualification work is aimed at finding ways to improve the performance of plate vacuum pumps, in particular reducing the specific energy consumption and reducing fluctuations in vacuum pressure in the suction pipe. On the basis of the performed analysis of scientific sources the ways of improvement of a design of the vacuum pump are established.

Qualification work solves the scientific problem of increasing the efficiency of the plate vacuum pump by substantiating the parameters and modes of operation of the advanced design with a double principle of operation.

According to the results of analytical research, rational geometrical parameters and technological modes of operation of the developed vacuum pump have been established, the implementation of which reduces the specific energy consumption by a third, compared to serial vacuum pumps.

**Key words:** plate-rotor vacuum pump, pressure, specific energy consumption, specific supply, geometric productivity..

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ДЛЯ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК .....	7
1.1. Загальна характеристика вакуумних насосів .....	7
1.2. Оцінка відомих конструкційно-технологічних рішень вакуумних насосів .....	10
1.3. Висновки до розділу 1 .....	12
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТАЦІЙНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА .....	13
2.1. Встановлення способів підвищення ефективності ротаційного пластинчатого вакуумного насоса .....	13
2.2. Розроблення структурно-функціональної схеми вакуумного насоса подвійної дії .....	14
2.3. Висновки до розділу 2 .....	17
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАКУУМНОГО НАСОСА ПОДВІЙНОЇ ДІЇ .....	18
3.1. Дослідження залежності конструкційних параметрів від технологічних режимів вакуумного насоса .....	18
3.2. Дослідження енергетичної ефективності розробленого вакуумного насоса .....	25
3.3. Висновки до розділу 3 .....	27
ВИСНОВКИ .....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	29

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Машинне доїння корів у загальній системі виробництва молока є однією із самих складних і відповідальних технологічних операцій. Від якості виконання окремих елементів операції доїння кожною ланкою «людина-машина-тварина» та узгодженого функціонування відповідно до зоотехнічних вимог залежить повнота формування рефлексу молоковіддачі у корів, що сприятиме повноті видоювання та високій продуктивності [1, 2].

Невідповідність технічних параметрів доїльної установки встановленим зоотехнічним вимогам призводить до негативних наслідків. За результатами досліджень Вальдмана [3] причиною непродуктивного використання доїльних установок найчастіше є конструктивні недоліки доїльних машин та вакуум-силових установок. Конструктивні особливості вакуумної системи і, в першу чергу, фактична продуктивність вакуумного насоса визначають стабільність і величину вакуумного режиму доїльної установки. З метою запобігання значних коливань вакууму в системі деякі виробники пропонують використовувати вакуумні насоси підвищеної продуктивності. Аргументація такого кроку пояснюється створенням деякого «резерву повітря» у технологічних лініях доїльної установки. Це призводить до помилкового вибору вакуумного насоса для конкретної доїльної установки зі збільшеною подачею, і як наслідок, зі збільшеною потужністю приводу. Окрім цього, збільшена подача не спроможна подолати конструкційних недоліків ротаційно-пластинчатих насосів – значна флуктуація вакуумметричного у всмоктувальному патрубку, що викликана фізичним принципом роботи. Незважаючи на значне поширення вакуумних насосів роторно-пластинчатого типу, їм притаманні суттєві недоліки, які не дозволяють назвати дану технічну систему найбільш доцільною для доїльних установок.

Тому, вирішення проблеми удосконалення ротаційно-пластинчатих вакуумних насосів для доїльних установок у напрямку збільшення питомої продуктивності та зниження енергоємності процесу машинного доїння корів є

актуальним завданням, особливо в сучасних умовах значної вартості енергоносіїв.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є підвищення ефективності доїльних установок та машинного доїння, в цілому, шляхом удосконалення конструкції та режиму роботи ротаційних пластинчастих вакуумних насосів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

- провести огляд ротаційних вакуумних насосів різних виробників та оцінити їх вплив на технологічний процес машинного доїння корів;
- дослідити вплив на робочий процес ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки його конструктивних та технологічних параметрів;
- встановити раціональну структурно-функціональну схему ротаційного пластинчастого вакуумного насоса з мінімальними флуктуаціями тиску у всмоктувальному патрубку;
- встановити раціональні конструкційно-технологічні параметри запропонованого ротаційного вакуумного насоса подвійної дії;
- визначити ефективність експлуатаційних показників запропонованого ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки.

**Об'єкт дослідження** – вплив технологічного процесу ротаційного пластинчастого вакуумного насоса на рівень стабільності вакуумметричного тиску.

**Предмет дослідження** – залежності та режими роботи функціонування ротаційного пластинчастого вакуумного насоса з подвійним ротором.

**Методи досліджень.** В основу теоретичних досліджень покладено методи чисельного моделювання при використанні теорії математичного моделювання, основних положень гідравліки, гідро-газодинаміки, основних положень вакуумної техніки та законів термодинаміки. При цьому застосовувались методи диференційного та інтегрального числення.

Обробка та аналіз результатів досліджень здійснювалась з використанням теорії ймовірності, кореляційного та регресійного аналізу, при цьому використовувався програмний продукт Excel.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати досліджень кваліфікаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на міжнародній конференції та відображені у наступних роботах:

1. Стадник В. П. Встановлення продуктивності ротаційного вакуумного насоса. *Матеріали науково-практичної конференції «Наукові читання–2020»*. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 218–219.

2. Стадник В. П. Оцінка вакуумних насосів доїльних установок. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 216–217.

3. Стадник В. П. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів ротаційних вакуумних насосів. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 246–247.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 3 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел (20 найменувань). Текст кваліфікаційної роботи виконано українською мовою на 30 сторінках загального обсягу машинописного тексту, проілюстровано 1 таблицею та 10 рисунками.

## РОЗДІЛ 1

### ОЦІНКА ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ДЛЯ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

#### 1.1. Загальна характеристика вакуумних насосів

При проектуванні доїльних установок, залежно від призначення, використовуються різноманітні схеми та конструкційні рішення вакуумних систем, основною складовою яких є вакуумні насоси (рис. 1.1) [4, 5, 6].

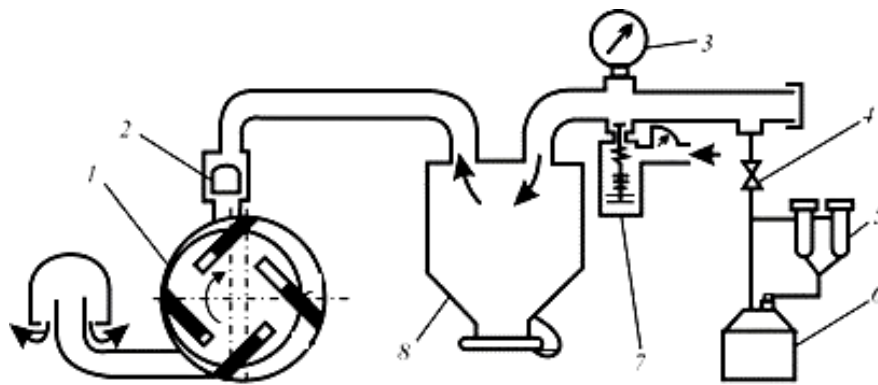
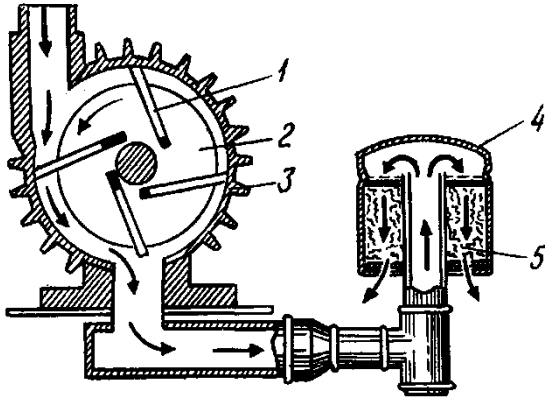


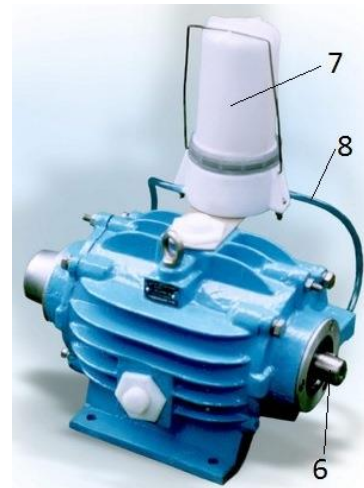
Рис. 1.1. Структурно-функціональна схема доїльної установки: 1 – насос вакуумний; 2 – захисний клапан; 3 – вакуумметр; 4 – кран вакуумний; 5 – підвісна частина доїльного апарата; 6 – відро молочне; 7 – регулятор гравітаційний вакуумний; 8 – ресивер вакуумний.

Основне призначення вакуумного насоса полягає у створенні сталого вакуумметричного тиску у трубопроводах доїльних установок для забезпечення функціонування доїльних апаратів, транспортування молока молочним шлангом доїльного апарата до молокопроводу доїльної установки та приведення в дію систем автоматики (наприклад, циркуляційного промивання).

Вітчизняні та закордонні виробники комплектують доїльні установки, в переважній більшості, пластинчастими вакуумними насосами (рис. 1.2). Це пояснюється досить високою продуктивністю, простотою конструкції, низькою вартістю насоса, незалежністю від природно-кліматичних умов [7, 8].



*принцип функціонування*



*серійний насос PBH-40/350*

Рис. 1.2. Пластинчасто-роторний вакуумний насос: 1 – пластини; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – заглушувач шуму; 5 – наповнювач глушника; 6 – вал зі шпонкою; 7 – місткість з оливою; 8 – подача оливи.

Проведені дослідження [9, 10] свідчать, що з усіх типів вакуумних насосів, котрі призначені для доїльних установок, найкращі експлуатаційно-технологічні показники мають ротаційні вакуумні насоси пластинчатого типу (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1

Експлуатаційно-технологічні показники різнотипних вакуумних насосів

Тип вакуумного насоса	Коефіцієнт корисної дії	Коефіцієнт продуктивності	Питома енергоємність, кВт×год/м <sup>3</sup>
Ротаційно-пластинчатий	0,80-0,90	0,3-0,4	0,06-0,08
Рідинно-кільцевий	0,48-0,52	0,4-0,7	0,04-0,05
Дватороторний (Рутса)	0,70-0,80	0,6-0,8	0,64-0,82

Як видно із табл. 1.1, ротаційні пластинчасті вакуумні насоси характеризуються найбільшим ККД, але поступаються водо-кільцевим за питомою енергоємністю та коефіцієнтом продуктивності. Незважаючи на це мають ряд переваг, що зумовлює їх популярність. Перевагами є: добра



урівноваженість, при досить великих обертах; менші пульсації вакууму; невеликі габаритні розміри; відсутність рухомих клапанів; спрощена схема розподілу повітря; плавний хід; висока швидкохідність.

Ротаційні вакуумні насоси різних виробників відрізняються один від одного розташуванням ротора відносно осі корпусу, перерізом впускного та випускного вікон, просторовим розташуванням в корпусі вікон всмоктування та нагнітання, частотою обертання ротора, матеріалом пластин, геометричними розмірами, масою та дійсною продуктивністю [9, 10, 11, 12], що визначає питомі показники роботи (рис. 1.3).

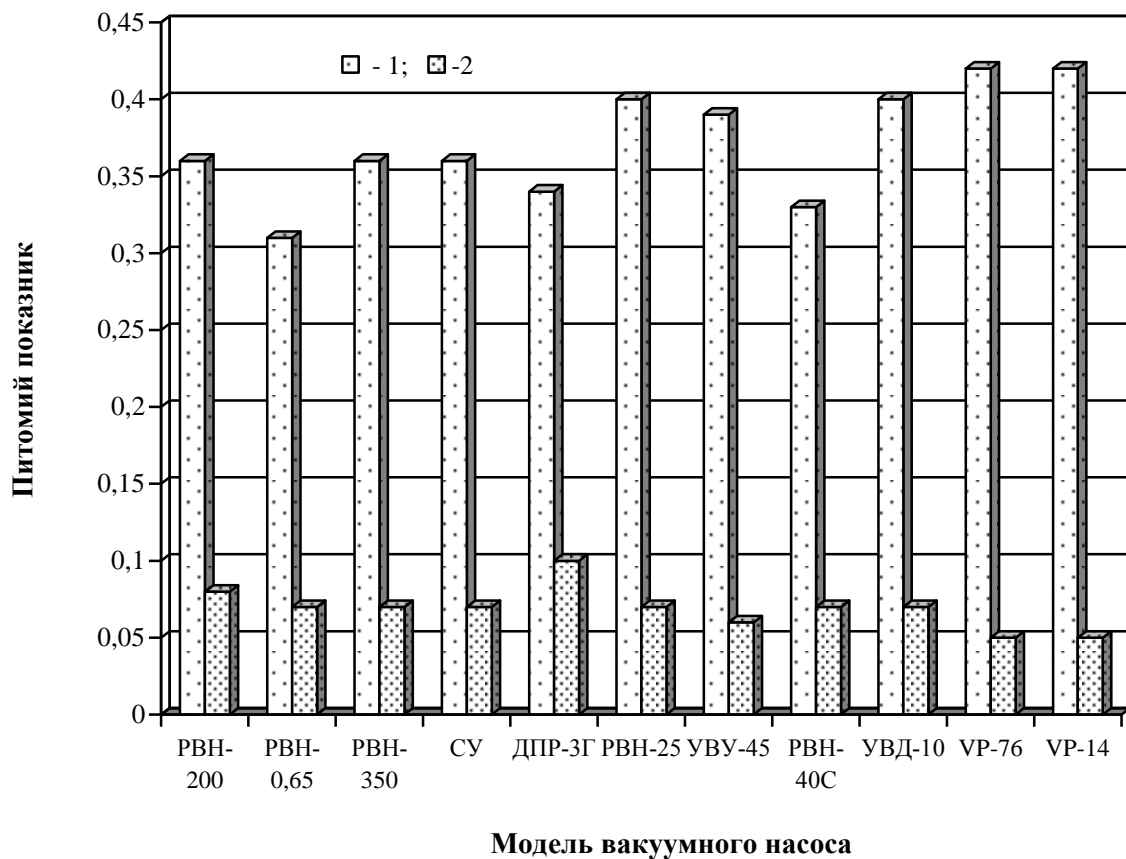


Рис. 1.3. Характеристика ротаційних вакуумних насосів різних виробників за показниками: 1 – питома подача, м³/м³; 2 – питома енергоємність, кВт×год/м³.

Залежно від заданої продуктивності, вакуумні насоси випускають різної потужності з різним режимом та частотою обертання ротора, але, незважаючи

на це, вони конструкційно подібні. Питома енергоємність вітчизняних ротаційних пластинчатих вакуумних насосів (рис. 1.3) знаходиться майже на одному рівні, хоча перевищує показники закордонних фірм-виробників. Така сама ситуація із коефіцієнтом подачі, який визначає співвідношення дійсної продуктивності до геометричної [10, 11, 12]. При цьому, вакуумні насоси фірми DeLaval (Швеція) моделей VP 76 та VP 14 за питомою подачею перевищують найкращий показник вітчизняних насосів на 5 %, а за рахунок узгодження конструкційних та технологічних параметрів питома енергоємність знижується на 32 % щодо середнього показника ( $0,073 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ ) вітчизняних насосів.

Отже, виникає необхідність детально розібратися у впливі кожного геометричного та конструкційного параметра і режиму роботи вакуумного насоса на можливість підвищити експлуатаційні показники роботи.

## **1.2. Оцінка відомих конструкційно-технологічних рішень вакуумних насосів**

Одним із шляхів зменшення показника питомої енергоємності вакуумного насоса є збільшення його продуктивності та зниження потужності на привід. При цьому дійсну продуктивність вакуумного насоса можна визначити за формулою:

$$Q_0 = \lambda \cdot Q_z, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – питома подача вакуумного насоса;

$Q_z$  – геометрична продуктивність вакуумного насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Геометрична продуктивність вакуумного насоса визначається за допомогою відомої залежності [13]:

$$Q_z = z \cdot S_n \cdot L \cdot n, \quad (1.2)$$

де  $z$  – кількість пластин у пазах ротора, шт.;

$S_n$  – максимальна площа порожнини між суміжними пластинами,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – конструкційна довжина ротора,  $\text{м}$ ;

$n$  – частота обертання ротора,  $\text{с}^{-1}$ .

Відповідно до залежності (1.2) продуктивність вакуумного насоса можна збільшити, наприклад за рахунок збільшення кількості пластин. Експериментальні дослідження [13, 14, 15] вказали, що при збільшенні кількості пластин від 2 до 3 продуктивність насоса дійсно зростає на 14,2 %. При наступному збільшенні кількості пластин від 3 до 4 продуктивність насоса зростає лише на 4,5 %. Подальше збільшення кількості пластин не має суттєвого впливу на продуктивність ротаційного вакуумного насоса. Серед негативних факторів збільшення кількості пластин у роторі є зростання втрат на тертя, що впливає на зростання енергоємності процесу. Окрім цього, більша кількість пластин забирає додатковий об'єм за рахунок своєї товщини, а це знижує геометричну швидкість вакуумного насоса. У зв'язку із цим, розроблені рекомендації [13, 14] щодо вибору кількості пластин, а виробники обладнання для доїння корів зупинились на конструкції насоса котрий комплектується трьома або чотирма пластинами.

При зміні ексцентриситету змінюється величина максимального об'єму простору між лопатками, що повинно вплинути на зростання продуктивності вакуумного насоса. Але величина ексцентриситету має бути обмежена, можливою з точки зору міцності ротора, глибиною залягання пластин, а також міцністю пластини (тобто, їх товщиною). Вченими доведено, що зі збільшенням різниці тисків власне насоса та тиску нагнітання, пластини із пазів ротора мають мати мінімальний вихід, тобто, менший ексцентриситет сприяє підвищенню надійності насоса [14, 15].

У серійній вакуумній установці УВУ-45/60 продуктивність вакуумного насоса змінюють з фіксованого значення  $45 \text{ м}^3/\text{год}$  до фіксованого значення  $60 \text{ м}^3/\text{год}$  шляхом застосування ступеневого збільшення частоти обертання ротора за рахунок зміни передаточного відношення клинопасової передачі [4, 6,

8, 9]. Такий крок призводить до пропорційного збільшення потужності на привод, що нівелює це рішення, щодо підвищення ефективності вакуумного насоса, як таке. При цьому, більшу продуктивність установки УВУ-45/60 використовують для доїльних установок котрі обладнання пневматично керованими автоматичними системами [9].

В переважній більшості роботи вчених були спрямовані на встановлення раціональних параметрів, відповідно до отриманих дослідних даних, у напрямку вибору найкращого співвідношення між ексцентриситетом, діаметром статора та ротора і кількістю пластин. Проте, досить суттєвій проблемі, а саме, наявності значних флуктуацій тиску у всмоктувальному патрубку не приділялось достатніх досліджень.

### **1.3. Висновки до розділу 1**

1. Ротаційні пластинчасті вакуумні насоси є найбільш поширеним джерелом вакууму у доїльних установках. При цьому дана технічна система потребує покращення деяких питомих показників роботи, зокрема питомої подачі та питомої енергоємності. Цього можна шляхом оптимізації конструкційних та експлуатаційних параметрів; узгодження вакуумного насоса до потреб під час його вибору під конкретні умови функціонування відповідного типу доїльної установки; оптимізації технологічних режимів вакуумного насоса.

2. Потребує подальшого дослідження встановлення основних шляхів зменшення флуктуацій вакуумметричного тиску у всмоктувальному патрубку, як перспективного напрямку покращення експлуатаційних показників ротаційно-пластинчастих вакуумних насосів.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТАЦІЙНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

#### 2.1. Встановлення способів підвищення ефективності ротаційного пластинчатого вакуумного насоса

Висока продуктивність вакуумного насоса є запорукою забезпечення стабільного вакууму під час роботи доїльної установки. Але збільшення продуктивності за рахунок збільшення кількості пластин ротора призводить до зростання втрат на тертя, збільшення геометричних параметрів викличе зростання ваги насоса, а встановлення адаптованої до вакуумного режиму роботи доїльної установки частоти обертання вакуумного насоса для компенсації втрат тиску вимагає додаткових затрат на обладнання для зміни частоти електричного струму [13, 14, 16].

Тому, варто звернути увагу на один із недостатньо досліджених напрямків підвищення ефективності вакуумного насоса за рахунок зменшення флуктуацій тиску у всмоктувальному патрубку. Робота роторного пластинчатого вакуумного насоса супроводжується періодичними коливаннями вакуумметричного тиску за рахунок зміни об'єму всмоктувальної камери залежно від кута повороту ротора. Ступінь нерівномірності відкачування повітря пластинчасто-ротаційним вакуумним насосом визначається за допомогою відомої залежності [14]:

$$\delta = \frac{500}{z^2}, \quad (2.1)$$

де  $z$  – кількість пластин у пазах ротора, шт.

Як видно із залежності (2.1) зі збільшенням кількості пластин у пазах ротора ступінь нерівномірності відкачування повітря із вакуумної системи

доїльної установки буде зменшуватись. Наприклад, якщо для трьох пластин цей показник становить 55,5 %, то для чотирьох – 32,2 %, а для шести – 13,9 %. Тому, деякі виробники, особливо вакуумних насосів не сільськогосподарського використання, у своїх конструкціях використовують шість пластин, але при цьому використовують мінімальну товщину [14], що викликає додаткові витрати на матеріал пластин.

Недоцільність використання у конструкції ротаційних пластинчастих насосів кількості пластин більшої від чотирьох описувалось в пункті 1.2 цієї роботи. Тому, наукове завдання полягає у розробленні конструкції вакуумного насоса, який би увібрав позитивні сторони відомих конструкцій, але забезпечував мінімальну ступінь нерівномірності відкачування повітря. Це дало б змогу зменшити розміри вакуумних балонів, котрі призначені для компенсації флуктуацій тиску у всмоктувальному патрубку, що вплине на здешевлення вакуумної установки в цілому.

## **2.2. Розроблення структурно-функціональної схеми вакуумного насоса подвійної дії**

Нерівномірність відкачування вакуумним насосом із чотирма пластинами у пазах ротора на рівні 32 % є досить великою величиною. У зв'язку із цим пропонується вирішити вказану проблему шляхом одночасного включення у роботу двох роторів з однаковою кількістю пластин. Узгодити роботу двох паралельно працюючих насосів із зсувом фаз всмоктування на  $45^{\circ}$  не можливо фізично з точки зору контролю процесу. Тому, пропонується технічне рішення (рис. 2.1), основна ідея якого полягає у конструюванні вакуумного насоса з двома напів-роторами в спільному корпусі, пластини яких зміщені на кут  $45^{\circ}$ . Таке рішення дозволяє одночасно задіяти у двічі більше пластин ротора в одній станині вакуумного насоса, що знизить ступінь нерівномірності відкачування повітря із вакуумної системи доїльної установки до 7,8% (відповідно до рівняння (2.1)).

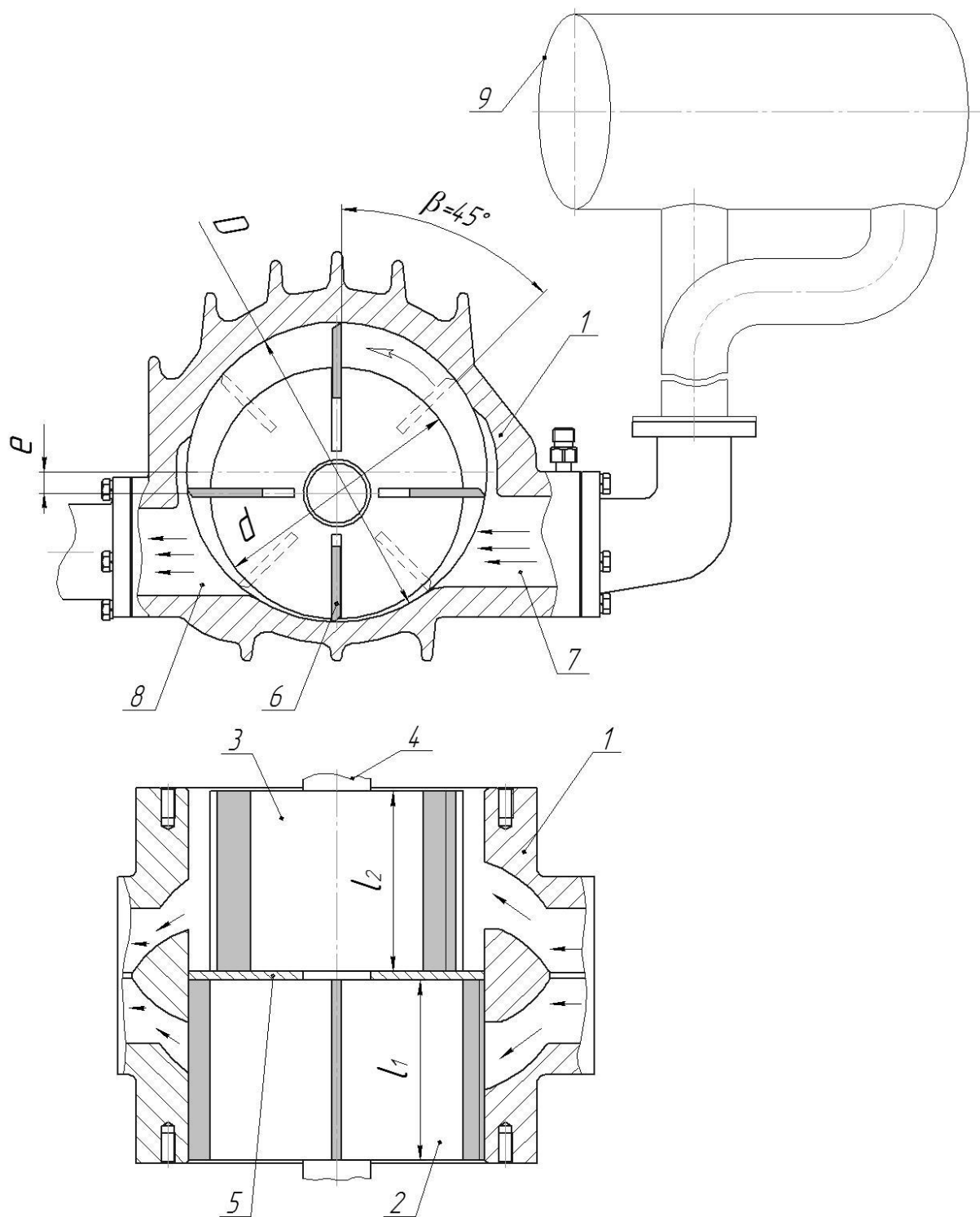


Рис. 2.1. Структурно-функціональна схема розробленого роторного пластинчастого вакуумного насоса подвійної дії: 1 – корпус; 2 – напівротор довжиною  $l_1$ ; 3 – напівротор довжиною  $l_2$ ; 4 – спільний вал роторів; 5 – роздільна пластина; 6 – пластина напівротора; 7 – всмоктувальний патрубок; 8 – нагнітальний патрубок; 9 – вакуумний балон.

Запропонована конструкція вакуумного насоса за габаритними розмірами відповідає серійному вакуумному насосу. Ротор має аналогічну загальну довжину, тільки поділений навпіл герметичною перетинкою, а пластини у пазах першого напівротора зміщені на кут  $\beta=45^\circ$  (рис. 2.1) відносно пластин другого напівротора. Одночасна робота, по суті двох паралельно включених вакуумних насосів значно знизить нерівномірність відкачування повітря, а тому коливання тиску також зменшаться (рис. 2.2).

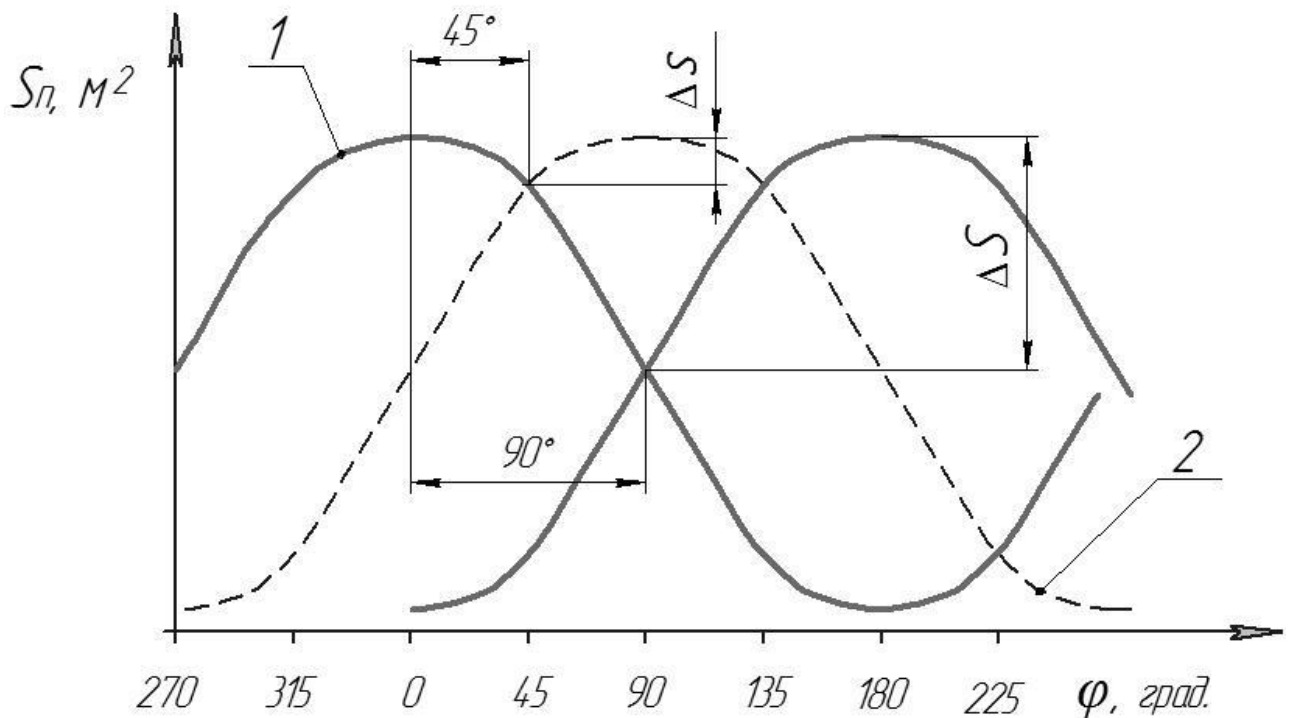


Рис. 2.2. Схема залежності зміни площі між пластинами ротора при його обертанні на кут  $\varphi$ : 1 – за умови використання серійного насоса із чотирма пластинами у роторі зміна площі максимального простору становить  $\Delta S$ ; 2 – за умови використання розробленого вакуумного насоса –  $\Delta s$ .

Пояснити зниження коливання тиску можна тим, що максимальна площа простору між двома пластинами у серійного насоса змінюється при обертанні ротора через кожні  $90^\circ$ , а у розробленого вакуумного насоса це буде відбуватись через кожні  $45^\circ$  (рис. 2.2). Відбувається це за рахунок одночасного



накладання максимального міжкоміркового простору обох напівроторів розробленого вакуумного насоса (рис. 2.2). В такому випадку зменшується ступінь нерівномірності відкачування повітря, оскільки фактично маємо вісім пластин на одному роторі, що обертаються одночасно.

### **2.3. Висновки до розділу 2**

1. Дослідження шляхів підвищення ефективності функціонування вакуумного пластинчастого роторного насоса встановили його гранично доцільні конструкційно-геометричні параметри стосовно кількості пластин, співвідношення основних розмірів та ексцентриситету. Встановили, що одним із шляхів покращення експлуатаційних показників може бути зменшення ступені нерівномірності відкачування повітря із вакуумної системи доїльної установки.

2. Розроблений пластинчасто-роторний вакуумний насос подвійної дії забезпечує суттєве зниження (до 7,8 %) ступені нерівномірності відкачування повітря за рахунок імітації двох паралельно працюючих насосів, але із зміщеними на  $45^\circ$  пластинами напівроторів. При цьому знижується рівень коливання тиску, що потребує застосування у вакуумній установці вакуумного балона меншого об'єму.

### РОЗДІЛ 3

## ВСТАНОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАКУУМНОГО НАСОСА ПОДВІЙНОЇ ДІЇ

### 3.1. Дослідження залежності конструкційних параметрів від технологічних режимів вакуумного насоса

Для забезпечення ефективної роботи пульсаторів доїльної установки необхідно створити заданий вакууметричний тиск. Для цього вакуумний насос повинен мати продуктивність відсмоктування повітря, яка перевищує витрати повітря всіма одночасно працюючими пульсаторами доїльної установки. Продуктивність доїльної установки ( $Q_m$ ) при роботі доїльних апаратів рекомендується визначати за формулою [17]:

$$Q_m = 1,35 \cdot \left( V_a \cdot \varrho \cdot \frac{p_1}{p_2} \right) \cdot n_a \cdot (1 + \xi), \quad (3.1)$$

де  $p_1$  – робочий тиск пульсатора доїльного апарата, Па;

$p_2$  – зовнішній тиск (відповідає рівню атмосферного тиску), Па;

$V_a$  – початковий об'єм повітря в камерах змінного тиску елементів доїльного апарата (пульсатор, колектор, повітропроводи), м<sup>3</sup>;

$\varrho$  – частота пульсацій пульсатора доїльного апарата, Гц;

$n_a$  – кількість одночасно працюючих доїльних апаратів, шт.;

$\xi$  – коефіцієнт резерву продуктивності вакуумного насоса, що враховує втрати через недосконалість конструкційний елементів доїльної установки та доїльного апарата та необхідність приводу у роботу пневматично керованих додаткових пристроїв [17].

Відповідно до залежності (3.1) на продуктивність вакуумного насоса має вплив співвідношення тисків, кількість доїльних апаратів (рис. 3.1). Для надійної роботи доїльної установки дійсна продуктивність вакуумного насоса

повинна перевищувати повітропродуктивність доїльної установки, тобто, має виконуватись умова:

$$Q_o \geq Q_m, \quad (3.2)$$

де  $Q_o$  – дійсна продуктивність вакуумного насоса, яка визначається відповідно до залежності (1.1), м<sup>3</sup>/год.

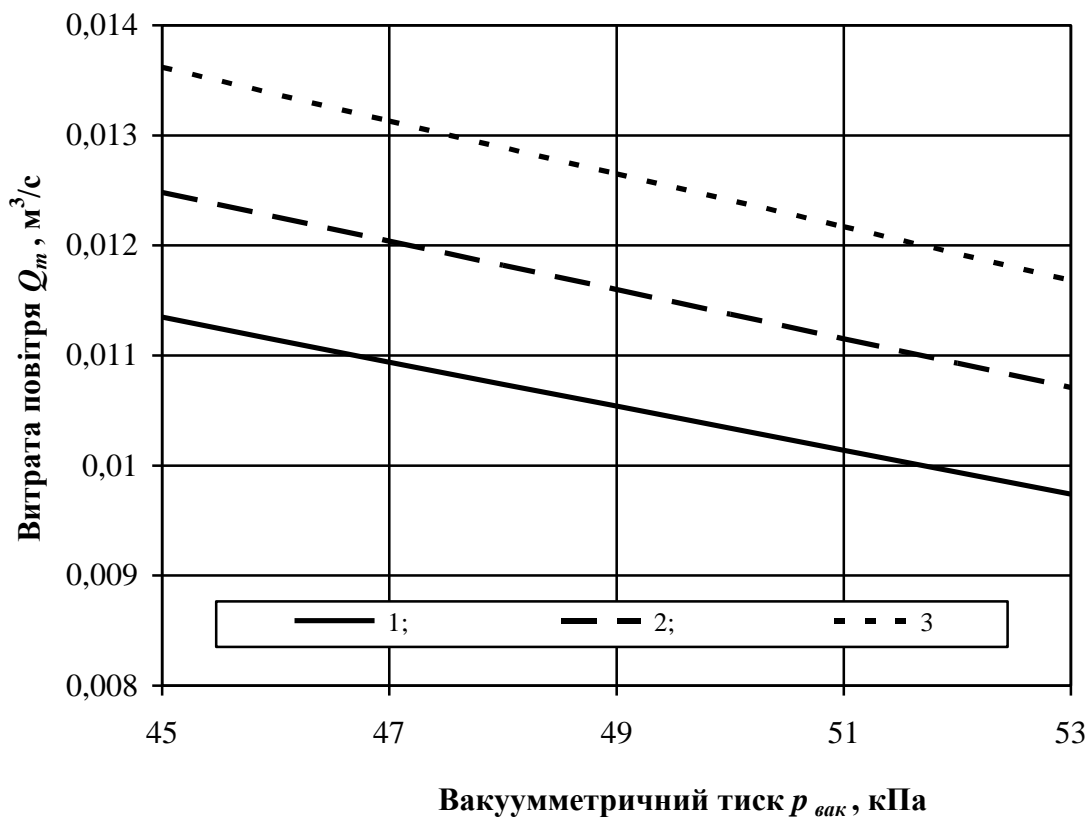


Рис. 3.1. Залежність витрати повітря доїльної установки від рівня вакуумметричного тиску при частоті пульсації пульсатора доїльного апарата: 1 –  $\vartheta=1,0$  Гц; 2 –  $\vartheta=1,1$  Гц; 3 –  $\vartheta=1,2$  Гц.

Відповідно до графічних залежностей (рис. 3.1), витрати повітря доїльними апаратами знижуються зі збільшенням рівня вакуумметричного тиску від 45 до 53 кПа на 20 %. Це можна пояснити зниженням рівня співвідношення абсолютного рівня тиску у вакуумній системі та зовнішнього

середовища ( $p_1/p_2$ ). При збільшенні частоти пульсації пневматичного пульсатора доїльного апарата від 1,0 до 1,2 Гц витрати повітря зростають на 14 % незалежно від рівня робочого вакуумметричного тиску. Це можна пояснити збільшеним надходженням повітря до вакуумної системи доїльної установки у зв'язку із більшою періодичністю появи такту стиску, а також за рахунок вищих втрат тиску на функціонування клапанної системи пульсатора. Дослідження проводились при умові одночасної роботи восьми доїльних апаратів.

Максимальна площа поперечного перерізу простору між сусідніми пластинами ( $S_n$ ), відповідно до рис. 2.2, буде при куті повороту ротора  $\varphi=0^\circ$ . При такому куті повороту другий напівротор повернеться на кут  $45^\circ$ , тому в загальному, максимальна площа простору між пластинами збільшиться у 1,5 рази. У зв'язку із цим отримаємо модифікований варіант залежності [13] для розробленого вакуумного насоса подвійної:

$$S_n = \frac{4 \cdot \pi \cdot e \cdot R}{z} + 0,5 \frac{4 \cdot \pi \cdot e \cdot R}{z} = \frac{6 \cdot \pi \cdot e \cdot R}{z}, \quad (3.3)$$

де  $e$  – ексцентриситет вакуумного насоса (див. рис. 2.1);

$R$  – радіус статора вакуумного насоса, м.

На основі рівнянь (1.1) та (1.2) та формули (3.3) встановлення площі, знайдемо залежність для визначення внутрішнього радіуса статора розробленого вакуумного насоса:

$$R = \frac{Q_n}{6 \cdot \pi \cdot e \cdot L \cdot n \cdot \lambda}, \quad (3.4)$$

де  $Q_n$  – продуктивність вакуумного насоса,  $Q_n \geq Q_m$ , м<sup>3</sup>/с;

$e$  – ексцентриситет вакуумного насоса (див. рис. 2.1), м;

$\lambda$  – коефіцієнт подачі;

$L$  – конструкційна робоча довжина ротора, м;

$n$  – частота обертання ротора,  $\text{с}^{-1}$ .

Таким чином, радіус статора буде визначатись геометричними параметрами ротора та ексцентриситетом при заданій частоті обертання ротора вакуумного насоса (рис. 3.2).

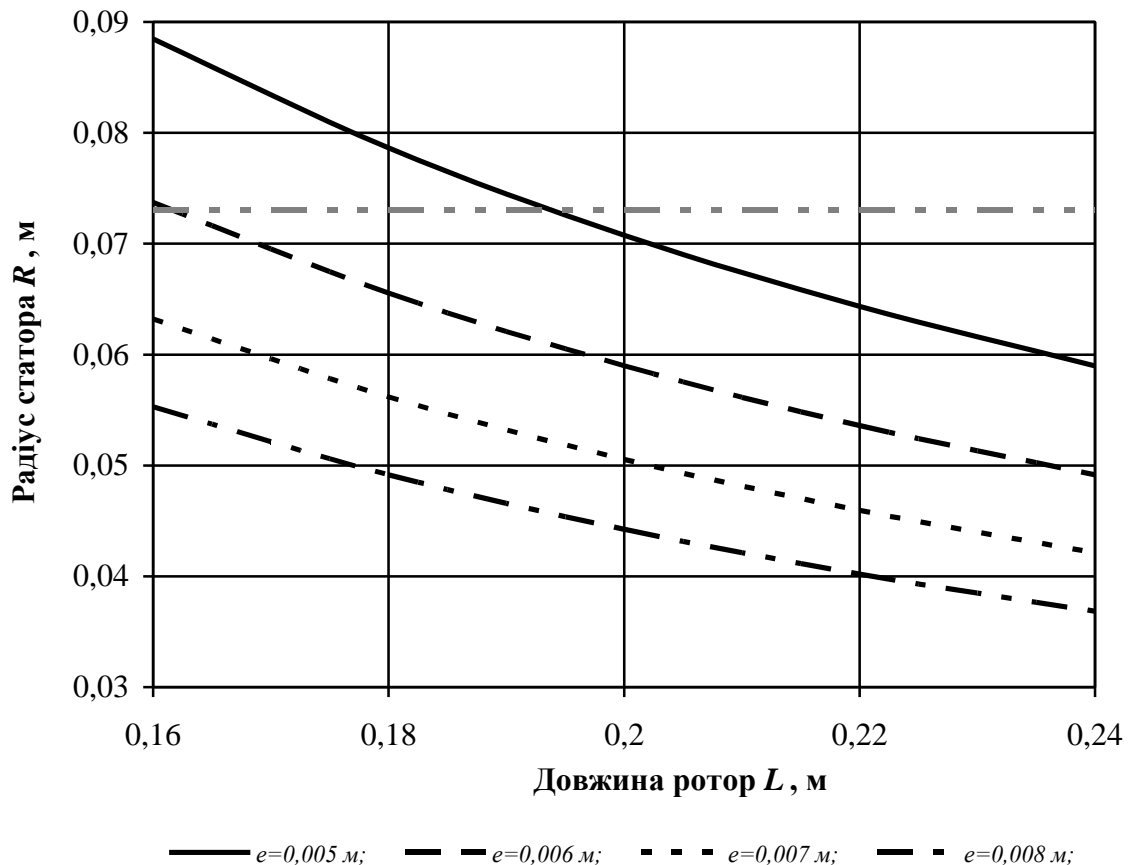


Рис. 3.2. Залежність радіуса статора вакуумного насоса від довжини його ротора при фіксованому ексцентриситеті за умови продуктивності насоса на рівні  $0,0140 \text{ м}^3/\text{с}$ , коефіцієнта подачі –  $\lambda=0,42$  та частоті обертання  $n=25 \text{ с}^{-1}$ .

Відповідно до отриманих графічних залежностей (рис. 3.2), зі збільшенням довжини ротора вакуумного насоса зменшується його радіус статора, незалежно від прийнятого у конструкції ексцентриситету. Але меншому значенню ексцентриситету відповідає більший радіус корпуса, незалежно від довжини ротора. При цьому вплив зміни ексцентриситету

вищий, оскільки при його збільшенні від 0,005 м до 0,008 м радіус корпусу зменшується на 38 %, а при зміні довжини ротора від 0,16 м до 0,24 м незалежно від ексцентриситету радіус зменшується на 33 %. Порівняння із серійним вакуумним насосом РВН вказує на те, що розроблений вакуумний насос при аналогічній довжині ротора (200 мм) має менше значення радіуса статора (від 44,2 мм до 70,7 мм, порівняно із 73 мм) у всьому діапазоні досліджуваних ексцентриситетів.

Менший радіус внутрішньої порожнини корпусу розробленого вакуумного насоса дозволяє зменшити габаритні розміри і, як наслідок, його масу, що позитивно вплине на показник питомої матеріаломісткості.

Геометричні та динамічні параметри розробленого вакуумного насоса пов'язані із теоретичною продуктивністю залежностями на рис. 3.3.

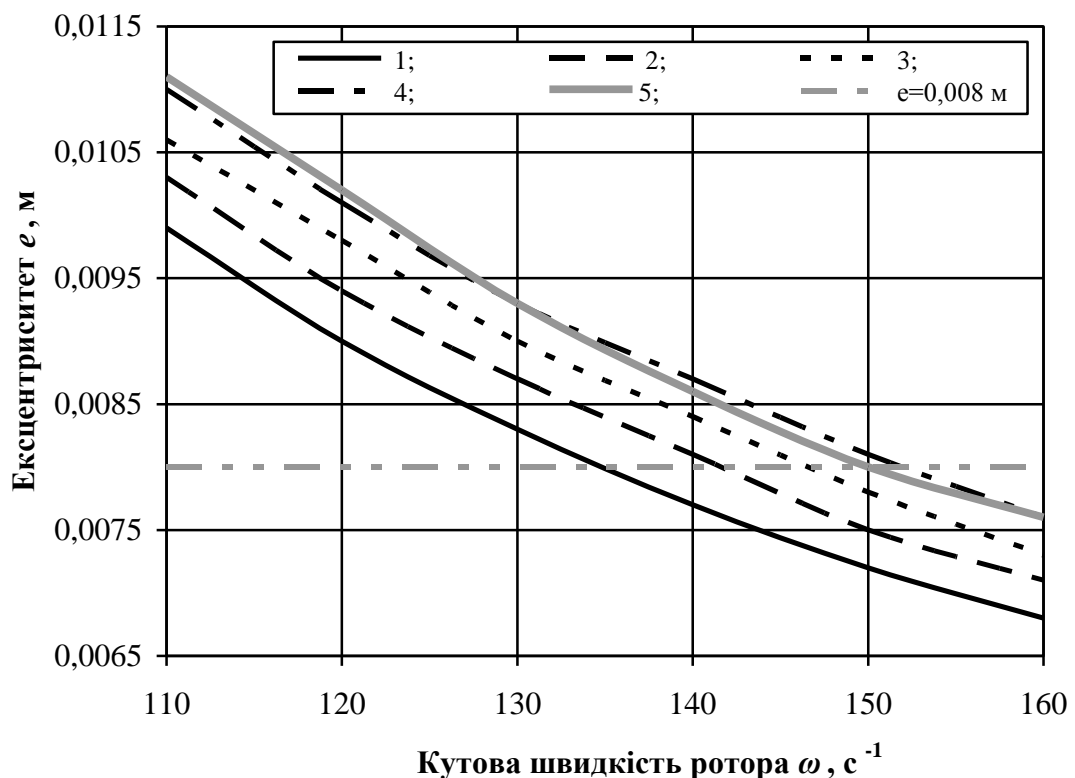


Рис. 3.3. Залежність ексцентриситету від кутової швидкості ротора вакуумного насоса за умови його продуктивності: 1 –  $Q_H=0,0125 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $Q_H=0,013 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $Q_H=0,0135 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 4 –  $Q_H=0,014 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 5 – насос РВН-40/350.

З графічних залежностей на рис. 3.3. випливає, що зі зростанням частоти обертання ротора ексцентриситет зменшується на 11–13 % незалежно від продуктивності вакуумного насоса. Але існує прямопропорційна залежність між продуктивністю вакуумного насоса та ексцентриситетом – вищій продуктивності відповідає більше значення ексцентриситету незалежно від частоти обертання ротора. За умови використання фіксованого (як у вакуумного насоса РВН-40/350) ексцентриситету на рівні 0,008 м, при зростанні продуктивності від 0,0125 до 0,014 м<sup>3</sup>/с, кутова швидкість обертання ротора знаходиться в діапазоні від 135 до 152 рад/с (рис. 3.3). За розрахункової продуктивності 0,0135 м<sup>3</sup>/с, кутова частота обертання ротора розробленого вакуумного насоса має становити 146 рад/с при ексцентриситеті 0,008 м, або 152 рад/с при продуктивності 0,0140 м<sup>3</sup>/с.

Відповідно із рекомендаціями [17], отримаємо залежність для визначення продуктивності вакуумного насоса, котрий має чотири пластини на одному роторі:

$$Q_o = 0,98 \cdot e \cdot D \cdot L \cdot \omega \cdot \eta \cdot \psi, \quad (3.5)$$

де  $Q_o$  – дійсна розрахункова продуктивність розробленого вакуумного насоса, м<sup>3</sup>/с;

0,98 – коефіцієнт узгодження кількості пластин, значення синуса кута повороту ротора при максимальній площі поперечного перерізу між двома сусідніми пластинами ротора;

$D$  – внутрішній діаметр статора вакуумного насоса, м;

$\omega$  – кутова частота обертання ротора, с<sup>-1</sup>;

$\eta$  – манометричний коефіцієнт вакуумного насоса, визначається як співвідношення абсолютних рівнів тиску  $p_1/p_2$ , відповідно до формули (3.1);

$\psi$  – ступінь наповнення камери всмоктування вакуумного насоса, визначається відповідно до рекомендацій [13, 17].

Відповідно до залежності (3.5), зі зростанням частоти обертання ротора продуктивність вакуумного насоса має зростати при незмінних геометричних параметрах (рис. 3.4), але суттєво залежить від манометричного коефіцієнта та ступені наповнення простору між пластинами ротора.

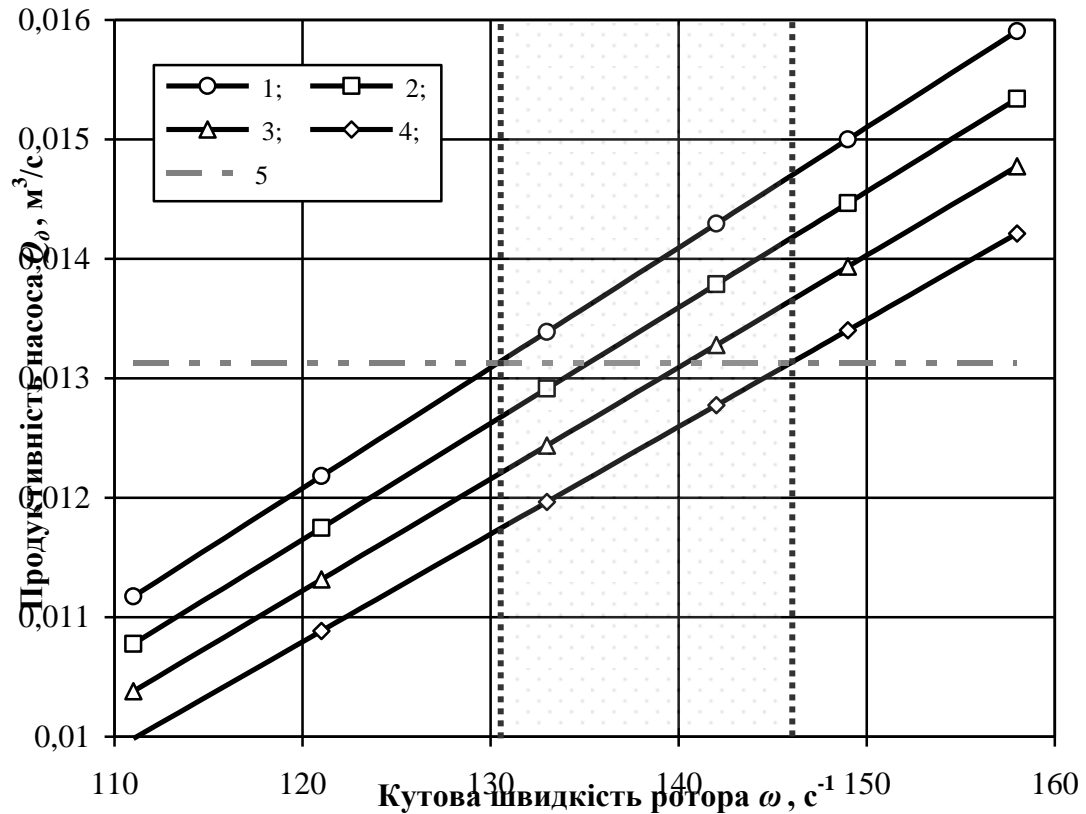


Рис. 3.4. Залежність дійсної продуктивності розробленого вакуумного насоса від кутової швидкості ротора при рівні вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки: 1 – 45 кПа; 2 – 47 кПа; 3 – 49 кПа; 4 – 51 кПа; 5 – мінімально гранична продуктивність вакуумного насоса при вакуумметричному тиску 47 кПа – 0,01313 м³/с (рис. 3.1).

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.4 вказує на те, що при зростанні рівня вакуумметричного тиску продуктивність вакуумного насоса знижується. Це пояснюється зменшенням значення манометричного коефіцієнта, тобто, рівня співвідношення абсолютного тиску у вакуум-проводі та зовнішнього



середовища (відповідає тиску нагнітання). Мінімально допустима продуктивність розробленого вакуумного насоса, на виконання умови (3.2), досягається при кутовій швидкості обертання ротора 135 рад/с, що на 17 рад/с (11 %) менше ніж для серійного вакуумного насоса РВН-40/350, при цьому дійсна продуктивність на 0,00202 м<sup>3</sup>/с (18 %) вища за умови однакового рівня вакуумметричного тиску 47 кПа. Якщо використовувати кутову швидкість обертання ротора 146 рад/с, то дійсна продуктивність зросте до 0,0142 м<sup>3</sup>/с.

У визначеному діапазоні кутових швидкостей ротора 131–146 рад/с, продуктивність розробленого вакуумного насоса забезпечить мінімально допустиме значення у визначеному діапазоні рівнів робочого вакуумметричного тиску від 45 до 51 кПа.

### **3.2. Дослідження енергетичної ефективності розробленого вакуумного насоса**

Ефективна потужність для приводу розробленого вакуумного насоса складається із індикаторної потужності та потужності на подолання сил тертя пластин ротора по внутрішній поверхні статора, пластин у пазах ротора, у підшипниках та в ущільненнях (рис. 3.5), визначається за формулою [13]:

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_m}, \quad (3.6)$$

де  $N_i$  – індикаторна потужність вакуумного насоса, Вт;

$\eta_m$  – коефіцієнт, який враховує механічні втрати на тертя, може прийматись відповідно до рекомендацій [13].

Індикаторну потужність рекомендується визначати за допомогою формули [13, 18]:

$$N_i = \left[ \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot Q_2 \cdot \left( \left( \frac{p_n}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \right] \cdot \xi_{cm} \cdot \xi_{z\partial}, \quad (3.7)$$

де  $Q_2$  – геометрична продуктивність розробленого вакуумного насоса, формула (1.2) м<sup>3</sup>/с;

$n$  – показник політропи, для повітря приймається таким як і для двоатомного газу [19, 20];

$p_n$  – тиск нагнітання вакуумного насоса, приймається рівним  $p_2$ , Па

$\xi_{cm}$  – коефіцієнт стиску, який враховує втрати тиску на перетікання повітря між щілинами конструкційних елементів [13];

$\xi_{z\partial}$  – коефіцієнт на подолання гідравлічних втрат під час нагнітання [13].

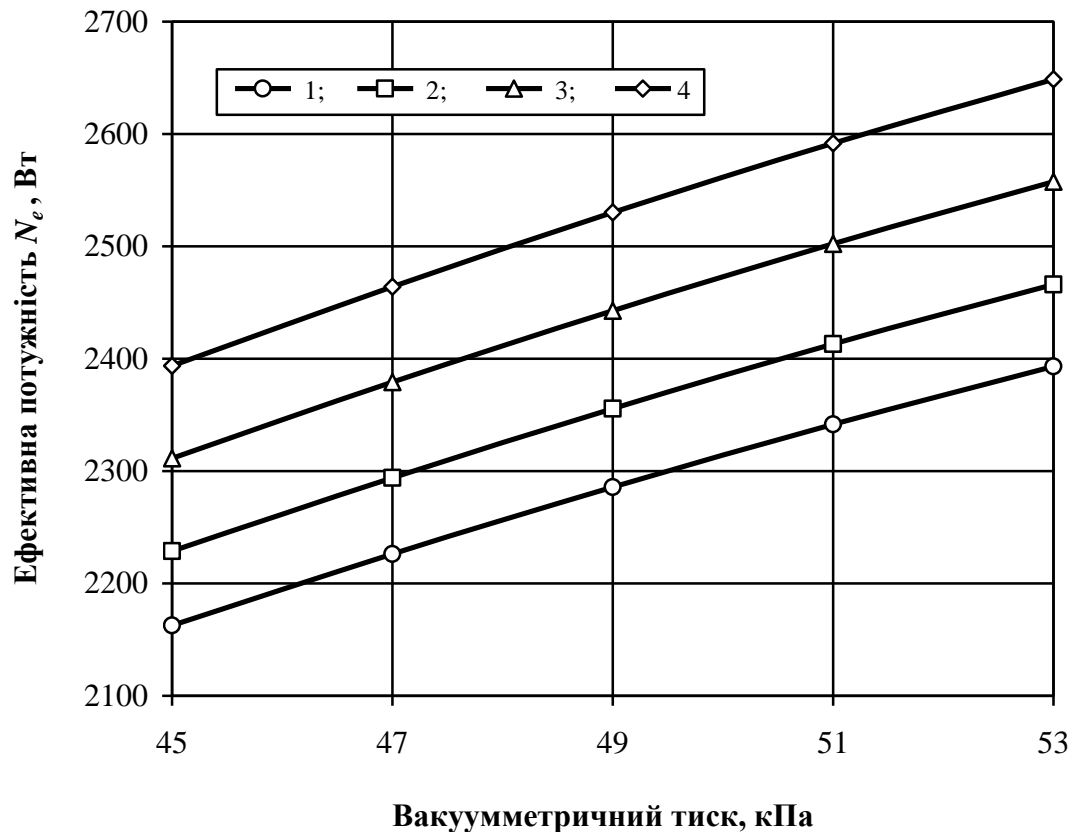


Рис. 3.5. Залежність ефективної потужності приводу розробленого вакуумного насоса від рівня робочого вакуумметричного тиску при кутовій швидкості обертання ротора ( $\omega$ ): 1 – 131 рад/с; 2 – 135 рад/с; 3 – 140 рад/с; 4 – 146 рад/с.

Зі зростанням рівня вакуумметричного тиску (рис. 3.5) збільшується потужність на привод вакуумного насоса на 11 % у всьому діапазоні досліджуваних кутових швидкостей обертання ротора. Це можна пояснити збільшенням величини співвідношення тиску нагнітання до тиску всмоктування ( $p_n/p_1$ ) за рахунок зменшення тиску  $p_1$ . При зростанні кутової швидкості обертання ротора від 131 рад/с до 146 рад/с потужність на привод вакуумного насоса зростає на 11 % незалежно від рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки.

Продуктивність розробленого вакуумного насоса при рівні робочого вакуумметричного тиску 47 кПа та кутовій швидкості обертання ротора 146 рад/с становить 51,12 м<sup>3</sup>/год, що на 27,8 % більше ніж для серійного вакуумного насоса РВН-40/350 при зниженні потужності приводу на 9,4 %. У зв'язку із цим отримуємо показник питомої енергоємності на рівні 0,048 кВт×год/м<sup>3</sup>, що на 31,4 % менше ніж у серійного вакуумного насоса.

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. Встановлено взаємозв'язок геометричних та технологічних параметрів вакуумного насоса. Так, зі збільшенням довжини ротора вакуумного насоса зменшується його радіус статора, при цьому меншому значенню ексцентриситету відповідає більший радіус корпусу, незалежно від довжини ротора. Продуктивність вакуумного насоса зростає зі збільшенням ексцентриситету незалежно від частоти обертання ротора.

2. Проведені дослідження вказали на раціональні параметри розробленого вакуумного насоса подвійної дії які забезпечують, порівняно із серійним насосом, вищу на 27,8 % продуктивність, меншу на 9,4 % потужність на привод та менший на 31,4 % показник питомої енергоємності.

## ВИСНОВКИ

1. Ротаційні пластинчасті вакуумні насоси для доїльних установок потребують покращення деяких питомих показників роботи, зокрема питомої подачі та питомої енергоємності. Окрім цього такому типу вакуумних насосів притаманна проблема коливання вакуумметричного тиску у всмоктувальному патрубку, що зумовлено особливістю його конструкції та принципу функціонування. Тому зменшення ступені нерівномірності відкачування повітря із вакуумної системи доїльної установки за рахунок удосконалення конструкції вакуумного насоса є одним із шляхів покращення його експлуатаційних показників.

2. У роботі представлено конструкцію пластинчасто-роторного вакуумного насоса подвійної дії, що дозволить знизити до 7,8 % ступінь нерівномірності відкачування повітря за рахунок імітації двох паралельно працюючих насосів, але із зміщеними на  $45^\circ$  пластинами напівроторів. При цьому знижується рівень коливання тиску, що потребує застосування у вакуумній установці вакуумного балона меншого об'єму, а зниження інерційних навантажень сприятиме зменшенню потужності на привод вакуумного насоса.

3. Дослідження режимних характеристик розробленого вакуумного насоса вказали, що його продуктивність, порівняно із серійним вакуумним насосом РВН-40/350, зростає на 27,8 % ( $51,12 \text{ м}^3/\text{год}$ ) за умови робочого вакуумметричного тиску на рівні 47 кПа та кутовій швидкості обертання ротора 146 рад/с при зниженні потужності приводу на 9,4 %. Встановлено раціональні конструкційні параметри внутрішнього діаметра статора 142 мм при загальній довжині ротора 220 мм для розробленого вакуумного насоса. За таких конструкційно-технологічних параметрах розробки показник питомої енергоємності буде становити  $0,048 \text{ кВт} \times \text{год}/\text{м}^3$ , що на 31,4 % менше ніж у серійного вакуумного насоса.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карташов Л. П. Машинное доение коров. М. : Колос, 1982. 301 с.
2. Карташов Л. П., Ушаков Ю. А. О контролируемых параметрах вакуумной системы доильной установки. *Вестник Оренбургского государственного университета*. Оренбург: ОГУ, 2011. № 8 (127). С. 220–223.
3. Вальдман Э. К. Физиология машинного доения коров. Л. : Колос, 1977. 191 с.
4. Машинне доїння корів і первинна обробка молока. / за ред. А. І Фененко. 2-е вид. перероб. і доп. К.: Урожай, 1990. 216 с.
5. Алієв Е. Б. Оптимізація техніко-технологічних параметрів вакуумної системи доїльної установки. *Зб. наук. праць Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 12. С. 138–147.
6. Механизация и автоматизация молочных ферм. / В. А. Ясенецкий и др. К.: Урожай, 1992. 392 с.
7. Посібник-практикум: машини та обладнання для тваринництва / І. І. Ревенко та ін. К.:Кондор, 2011. 396 с.
8. Машини для тваринництва та птахівництва. / за ред. В. І. Кравчука та Ю. Ф. Мельника. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. 207 с.
9. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика: монографія. К., 2008. 198 с.
10. Москаленко С., Ліщинский С. Методика комплексної оцінки ефективної експлуатації доїльних установок. *Техніка і технологія АПК*. УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2010. № 8(11) С. 29–31.
11. Стадник В. П. Оцінка вакуумних насосів доїльних установок. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 216–217.

12. Стадник В. П. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів ротаційних вакуумних насосів. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 246–247.
13. Фролов Е. С., Автономова И. В., Васильев В. И. Механические вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
14. Мжельский Н. И. Вакуумные насосы для доильных установок. М. : Машиностроение, 1974. 151 с.
15. Хамеев В. М. Термодинамические процессы и параметрические характеристики вакуумных насосов. Новосибирск: Наука, 1986. 78 с.
16. Коновалов О. В., Медведський О. В., Шапіренко В. В. Дослідження автоматичної системи регулювання вакуумметричного тиску доїльних установок. *Вісник ЖНАЕУ*. 2010. Вип. 2 (27). С. 172–177.
17. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1985. 560 с.
18. Вакуумная техника : справочник. / Фролов Е. С., и др. ; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М. : Машиностроение, 1992. 480 с.
19. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Теоретические основы вакуумной техники. М. : Энергоиздат, 1988. 340 с.
20. Кузовлев В. А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи : учебник. М.: Высшая школа, 1975. 303 с.