

## АНОТАЦІЯ

Березовецька О.Г. Обґрунтування параметрів ротаційної вакуумної помпи для доїльних установок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування (галузь знань 13 – Механічна інженерія). – Львівський національний аграрний університет, Львів, 2020.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності вакуумної системи доїльної установки шляхом розроблення двороторної вакуумної помпи з ізотропними еластичними пластинами на торцях і виступах ротора, які обертаються у змащувальному середовищі.

Об'єктом дослідження є робочий процес створення вакуумметричного тиску та вакуумна двороторна помпа.

У дисертаційній роботі класифіковано вакуумні помпи для доїльних установок за функціональними ознаками і технічними характеристиками, на підставі аналізу впливу параметрів вакуумної системи на технологічний процес машинного доїння, обґрунтовано тип і особливості конструкції вакуумної помпи, яка уможливить підвищення ефективності вакуумної системи доїльної установки.

Встановлено, що вакуумна помпа повинна забезпечувати сталий вакуумний режим 48,0-52,0 кПа, коливання вакуумметричного тиску повинні не перевищувати 2,7 кПа, а подача вакуумної помпи повинна перевищувати витрати повітря доїльним апаратом в 2,25 рази, що обумовлено зоотехнічними, санітарно-гігієнічними та технологічними вимогами. В результаті аналізу існуючих конструкцій вакуумних pomp доїльних установок встановлено, що двороторна вакуумна помпа у порівнянні з іншими має високий механічний к.к.д. 0,85-0,93 % та коефіцієнт подачі 0,6-0,8, високу рівномірність подачі, швидкохідність, можливість працювати

спільно з форвакуумними помпами для збільшення їх відкачувальних характеристик, можливість безпосереднього з'єднання з двигуном, що вказує на найбільшу доцільність використання їх в якості силового агрегату доїльної установки.

Встановлено, що основними факторами, які впливають на процес роботи вакуумних pomp є фізико-механічні властивості матеріалу роторів (коефіцієнт тертя, матеріал еластичних елементів), геометричні (перетікання повітря, внутрішній діаметр статора, діаметри роторів) і технологічні параметри (частота обертання роторів, встановлений рівень вакууметричного тиску).

Обґрунтовано раціональні конструкційні розміри, такі як радіус ротора, віддаль між умовними центрами двох заокруглень роторів, на основі аналізу роботи двороторної вакуумної помпи для роторів у вигляді овалу Кассіні.

Отримано аналітичну залежність корисної площі поперечного перерізу помпи на основі нормального еліптичного інтегралу другого роду, яка встановлює взаємозв'язок між конструкційними параметрами роторів, кутом повороту роторів, що уможливорює обґрунтування корисної площі поперечного перерізу від кута повороту роторів із врахуванням циклів періоду повороту. Корисна площа двороторної вакуумної помпи змінюється циклічно в межах від  $1500 \text{ мм}^2$  до  $700 \text{ мм}^2$  за наявності чотирьох циклів за один оберт роторів.

Проведено теоретичні дослідження конструкційно-технологічних параметрів вакуумної помпи дали змогу встановити взаємозв'язок між ними, а також їх вплив на процес перетікання повітря, що характеризує якість створення вакууметричного тиску.

В роботі застосовано методи математичного, статистичного моделювання, моделювання пришвидшення перетікання повітря в зазорах; чисельний метод у вигляді ряду Тейлора для визначення периметру проекції поверхні ротора; метод аналітичного моделювання тертя ізотропної пружної вставки в роторі об статор помпи; метод експериментального дослідження

коефіцієнта тертя, відкачувальної характеристики вакуумної помпи та потужності її приводу; проведено планований експеримент дослідження коефіцієнта тертя, відкачувальної характеристики та потужності приводу вакуумної помпи.

Розроблена лабораторна установка і вакуумна помпа для дослідження коефіцієнта тертя, відкачувальної характеристики і потужності приводу роторів з використанням тензорезистивних давачів. Використання води як мастильно-герметизуючої і охолоджуючої рідини уможливорює герметизацію прецизійних пар (ротор-ротор, ротор-статор), що зменшує перетікання повітря. Основним елементом вакуумної помпи є еластичні пластини, вставлені по периферії ротора, виготовлені з ізотропного матеріалу - гуми. Взаємодії між трибоелементами охоплюють процеси контакту, тертя, ковзання, зношування, а також режими змащування. Матеріал вставлених еластичних ущільнюючих елементів в ротори двороторної вакуумної помпи підібрано експериментально. Критерієм вибору є зменшення коефіцієнту тертя-ковзання, збільшення терміну експлуатації пар тертя-ковзання двороторної вакуумної помпи та висока еластичність в вакуумному середовищі.

Запропонована методика визначення коефіцієнта тертя з використанням води для змащування поверхні тертя роторів.

Розроблена методика і проведено калібрування тензометричної балки для експериментального визначення коефіцієнта тертя

Розроблено експериментальну двороторну вакуумну помпу для дослідження процесу створення вакуумметричного тиску, яка є складовою експериментальної лабораторної установки. Ротори вакуумної помпи виконані з гумовими вставками, виготовлені у вигляді еластичних пластин, забезпечують щільність пар тертя-ковзання у широкому діапазоні кутових швидкостей в середовищі змащувально-охолоджувальних рідин.

Встановлено, що зі збільшенням величини щілини між роторами і статором збільшується його еквівалентна довжина та зі зменшенням

вакууметричного тиску при швидкості перетікання повітря між поверхнею статора зменшується нелінійно. Теоретичними, на основі розробленої аналітичної залежності, і експериментальними, зі встановленими ізотропними пружними пластинами по периферії роторів, дослідженнями встановлено, що максимальна подача буде за 3000 об/хв й вакууметричного тиску 50,5 кПа і становитиме  $10 \text{ м}^3/\text{год}$ , а за 1470 об/хв –  $4,59 \text{ м}^3/\text{год}$ . Перетікання повітря не перевищить  $0,77 \text{ м}^3/\text{год}$ . За зменшення і зростання вакууметричного тиску, відмінного від 46-52 кПа, подача вакуумної помпи знижується, а перетікання повітря із зростанням вакууметричного тиску – зростає.

Встановлено, що коефіцієнт тертя  $f_T$  вакуумної помпи зменшується зі зменшенням величини зусилля  $F_H$  та при зростанні частоти обертання роторів  $n$ . За величини зусилля  $F_H$  від 65 до 135 Н та частоти обертання роторів  $n$  від 105 до 314 рад/с коефіцієнт тертя ковзання  $f_T$  знаходиться в межах від 0,035 до 0,052.

При цьому характер зміни коефіцієнту тертя-ковзання є нелінійним і підпорядковується квадратичній характеристиці. Зі збільшенням частоти обертання коефіцієнт тертя-ковзання, із використанням змащувальної рідини, зменшується і наближається до лінійної характеристики за частоти обертання  $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$ .

Встановлено, що робочим діапазоном вакуумної помпи є вакууметричний тиск  $P_B$  в межах від 38 до 62 кПа за якого, зі збільшенням частоти обертання роторів  $n$  від 1000 до 3000 об/хв, спостерігається зростання відкачувальної характеристики  $Q$  від 2,4473 до  $9,9117 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Встановлено, що із збільшенням частоти обертання роторів  $n$  від 1600 до 2400 об/хв та зміною вакууметричного тиску  $P_B$  від 38 до 62 кПа потужність вакуумної помпи  $N$  змінюється в межах від 99,74 до 250,64 Вт. Питома ефективна потужність двороторної вакуумної помпи не перевищує  $25 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ .

Отримано аналітичні залежності швидкостей і пришвидшень радіального і бокового переміщення повітря системи «ротор-статор» двороторної вакуумної помпи, які встановлюють взаємозв'язок між конструкційними параметрами ротора, вакуумметричним тиском, еквівалентною довжиною щілини, величиною зазору, на основі яких обґрунтовано конструкцію роторів з еластичними пружними пластинами на торцях та виступах роторів.

На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень з'ясовано особливості визначення коефіцієнта тертя-ковзання в середовищі змащувально-охолоджуючої рідини на різних режимах роботи вакуумної помпи, що допомогло з'ясувати особливості перебігу створення вакуумметричного тиску для доїльних установок.

Запропоновано встановлювати ізотропні еластичні пластини із використанням змащувально-охолоджуючої рідини. При цьому підвищується подача, надійність та екологічність вакуумної помпи.

Отримано патент на корисну модель двороторного вакуумного насоса зі змащуваними ізотропними еластичними пластинами.

Результати досліджень впроваджено у навчальний процес Львівського національного аграрного університету на кафедрі сільськогосподарської техніки під час виконання магістерських робіт, проведення лекцій і лабораторно-практичних робіт, а також оформлено співпрацю із товариством з додатковою відповідальністю «Брацлав» для проведення дослідно-конструкторської розробки двороторної вакуумної помпи зі змащуваними ізотропними еластичними пластинами встановленими у робочі органи.

**Ключові слова:** двороторна вакуумна помпа, ізотропна еластична пластина, перетікання, вакуумметричний тиск, коефіцієнт тертя-ковзання, відкачувальна характеристика.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ БЕРЕЗОВЕЦЬКОЇ О.Г. ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Гайдучок В.М., Сиротюк В.М., **Штойко О.Г.**, Березовецький С.А. Забезпечення надійності трибомеханічних систем ковзання у спряженнях вакуумних насосів. *Агроінженерні дослідження: Вісник Львівського державного аграрного університету*. Львів. ЛДАУ, 2006. № 10. С. 385-391. *Особистий внесок (0,12 д.а.): дисертанту належить вивчення коефіцієнта тертя у спряженнях вакуумних помп (0,32 д.а.).*

2. Syrotuk V.M., **Shtoyko O.G.**, Berezovetskyi S.A., Gayduchok V.M. Providing of reliability of the tribomechanical systems of sliding in the interfaces of vacuum pumps. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. 2008. №2. С.18-20. *Особистий внесок (0,1 д.а.): дисертантом обґрунтовано використання ізотропного матеріалу як ущільнення для вакуумних помп (0,2 д.а.).*

3. Сиротюк В.М., **Березовецька О.Г.**, Березовецький С.А. Дослідження якісних показників об'ємних вакуумних насосів стосовно застосування їх у доїльних установках. *Агроінженерні дослідження: Вісник ЛНАУ*. Львів. ЛНАУ. 2008. №12. Т.1. С.548-554. *Особистий внесок (0,2 д.а.): дисертантом досліджено якісні показники вакуумних помп доїльних установок (0,45 д.а.).*

4. Сиротюк В.М., **Березовецька О.Г.**, Березовецький С.А., Шацький В.І. Експериментальна установка для дослідження пар тертя роторів вакуумного насоса роторного типу. *Агроінженерні дослідження: Вісник ЛНАУ*. Львів. ЛНАУ. 2014. №18. С.258-262. *Особистий внесок (0,2 д.а.): дисертантом розроблено, виготовлено експериментальну установку, знято і опрацьовано показники роботи вакуумної помпи для доїльних установок (0,32 д.а.).*

### *Статті у наукових періодичних виданнях інших держав*

5. Syrotyuk V., **Berezovetska O.**, Berezovetskyi S., Humeniuk R., Sholudko Y. Modeling of pumping characteristics of two-rotor pump of the type “Roots”. *Teka. Quarterly journal of agri-food industry*. 2020, Vol. 20, No. 1, P. 33-40.

*Особистий*

*внесок (0,2 д.а.): дисертантом змодельовано відкачувальну характеристику двороторної помпи типу Рутс (0,5 д.а.)*

### **Матеріали наукових конференцій**

6. Сиротюк В.М., Гайдучок В.М., **Штойко О.Г.**, Березовецький С.А. Обґрунтування структури, параметрів і режимів роботи енергоощадного вакуумного насоса. *Теорія і практика розвитку АПК: Матеріали міжнародного науково-практичного форуму*. (Львів, 19-20 вересня 2006 р.). Львів. 2006. С. 409-412. *Особистий внесок (0,1 д.а.): дисертант обґрунтувала потребу в удосконаленні вакуумних енергоощадних pomp для доїльних установок (0,25 д.а.).*

7. Сиротюк В.М., **Березовецька О.Г.**, Березовецький С.А. Результати дослідження коефіцієнта тертя робочих органів ротаційної вакуумної помпи для доїльних установок. *Розвиток енергетичних систем в АПК: Міжнародна науково-практична конференція* (Дубляни, 2 вересня 2017 р.). Дубляни. 2017. *Особистий внесок (0,4 д.а.): дисертант провела експериментальні дослідження та встановила показники коефіцієнта тертя (0,1 д.а.).*

8. Коруняк П.С., **Березовецька О.Г.**, Березовецький С.А. Пристрій для дослідження коефіцієнта тертя-ковзання робочих органів вакуумного насоса доїльної установки. *Крамаровські читання: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції*. (Київ, 21 лютого 2019 р.). Київ: Видавничий центр НУБіП України. 2019. 174-176 с. *Особистий внесок (0,1 д.а.): дисертантом розроблено експериментальну установку для визначення коефіцієнта тертя (0,19 д.а.).*

9. Syrotyuk V., **Berezovetska O.**, Berezovetskyi S., Humeniuk R. The used two-rotors pump of the type Roots in vacuum devices for milking cows. *International conference on agriculture, technology, engireering and science:*

ICATES. 2019. (Львів, 18-20 вересня 2019 р.). Lviv. P.154. *Особистий внесок (0,007 д.а.): дисертантом описано переваги застосування двороторної вакуумної помпи під час машинного доїння індивідуальними доїльними установками (0,016 д.а.).*

***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

10. Сиротюк В.М., **Березовецька О.Г.**, Березовецький С.А., Гуменюк Р.В. Пристрій для дослідження коефіцієнта тертя-ковзання робочих органів вакуумного насоса. *Вчені ЛНАУ виробництва: каталог інноваційних розробок*. Випуск ХІХ. Львів. 2019. С.44. *Особистий внесок (0,007 д.а.): дисертантом виготовлено експериментальну вакуумну помпу двороторного типу, проведено експериментальні дослідження та встановлено значення коефіцієнта тертя (0,016 д.а.)*

11. Патент України на корисну модель №18566 А01С3/04 заявка u200605094. заявл. 10.05.2006. Ріш. прийн. 15.11.2006. Опубл. бюл. № 11, 2006. Вакуумний насос. Сиротюк В.М., **Штойко О.Г.** *Особистий внесок (0,012 д.а.): розроблено нову конструкцію двороторної вакуумної помпи (0,25 д.а.)*