

**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

**БОНЬКОВСЬКИЙ Олександр Юрійович**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО  
ВАКУУМНОГО НАСОСА**

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 – 2021

## АНОТАЦІЯ

Боньковський О. Ю. **Удосконалення конструкції перистальтичного вакуумного насоса.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021 р.

Метою кваліфікаційної роботи є пошук основних напрямків покращення режимних характеристик та надійності перистальтичних вакуумних насосів, зокрема збільшення питомої подачі та зниження флуктуацій вакуумметричного тиску у вакуумній магістралі доїльної установки. Виконаний аналіз доступних джерел, встановлено переваги та недоліки перистальтичних вакуумних насосів, зроблено висновок щодо доцільності удосконалення конструкції насоса.

У кваліфікаційній роботі вирішується наукове завдання підвищення ефективності перистальтичного вакуумного насоса шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи, вибору раціональних матеріалів щодо фізико-механічних властивостей для покращення ефективності технологічного процесу.

Результати досліджень вказали на оптимальні конструкційно-геометричні параметри та відповідні режимні характеристики удосконаленого перистальтичного вакуумного насоса.

**Ключові слова:** перистальтичний вакуумний насос, вакуумметричний тиск, питома подача, продуктивність.

## ANNOTATION

Bonkovsky O. Y. **Improving the design of a peristaltic vacuum pump.** - Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2021

The purpose of the qualification work is to find the main ways to improve the mode characteristics and reliability of peristaltic vacuum pumps, in particular to increase the specific supply and reduce fluctuations of vacuum pressure in the vacuum line of the milking parlor. The analysis of available sources is performed, the advantages and disadvantages of peristaltic vacuum pumps are established, the conclusion on expediency of improvement of a design of the pump is made.

The qualification work solves the scientific problem of increasing the efficiency of the peristaltic vacuum pump by substantiating the parameters and modes of operation, the choice of rational materials for physical and mechanical properties to improve the efficiency of the technological process.

The research results indicated the optimal design and geometric parameters and the corresponding operating characteristics of the advanced peristaltic vacuum pump.

**Key words:** peristaltic vacuum pump, vacuum gauge pressure, specific supply, productivity.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП .....   | 4  |
| РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО<br>ТИПУ .....   | 7  |
| 1.1. Загальна характеристика перистальтичних насосів .....  | 7  |
| 1.2. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів<br>перистальтичних насосів .....                                 | 9  |
| 1.3. Висновки до розділу 1 .....  | 11 |
| РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО<br>ВАКУУМНОГО НАСОСА .....                                     | 12 |
| 2.1. Обґрунтування конструкції удосконаленого перистальтичного<br>вакуумного насоса .....                           | 12 |
| 2.2. Визначення конструкційно-геометричних параметрів<br>перистальтичного вакуумного насоса .....                   | 14 |
| 2.3. Висновки до розділу 2 .....  | 18 |
| РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ<br>ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА ВАКУУМНОГО<br>НАСОСА .....            | 19 |
| 3.1. Дослідження процесу роботи удосконаленого<br>перистальтичного вакуумного насоса вакуумного насоса .....        | 19 |
| 3.2. Встановлення режимних характеристик розробленого<br>перистальтичного вакуумного насоса вакуумного насоса ..... | 22 |
| 3.3. Висновки до розділу 3 .....  | 28 |
| ВИСНОВКИ .....  | 29 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....  | 31 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Підвищення обсягів виробництва незбираного молока неможливе без удосконалення технологічного процесу та технічних засобів машинного доїння корів. Особливо це стосується особистих підсобних господарств населення, у яких за даними статистичних органів виробляється більше 70 % молока в країні [1].

Але господарства населення недостатньо забезпечені засобами механізації технологічного процесу машинного доїння корів. В першу чергу, це є основною перешкодою підвищення якості отриманого незбираного молока. Оскільки у господарствах населення переважає ручне доїння, молоко піддається забруднюючим факторам оточуючого середовища. Придбання технічних засобів, зокрема малогабаритних доїльних установок для невеликих господарств має як економічні так і технологічні чинники. Це, в першу чергу, стосується технічних засобів створення та підтримання стабільного вакуумметричного тиску у технологічних лініях доїльної установки. Стабільність вакуумметричного тиску є показником ефективності функціонування доїльного обладнання та процесу машинного доїння загалом [2].

Сучасні малогабаритні мобільні доїльні установки оснащені ротаційно-пластинчатими вакуумними насосами, що мають обмежений ресурс роботи за рахунок присутності постійного тертя, окрім цього створюють суттєвий шум при доїнні [2, 3]. Ротаційні вакуумні насоси мають значну вагу та потребують належного технічного обслуговування. Таких недоліків позбавлені перистальтичні насоси, які набули широкого використання для перекачування рідин та газових середовищ.

Таким чином, дослідження можливості використання для створення стабільного вакуумметричного тиску та розроблення адаптованої конструкції перистальтичного вакуумного насоса є актуальним завданням.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є підвищення ефективності перистальтичного вакуумного насоса за рахунок удосконалення конструкції для отримання стабільного вакуумметричного тиску.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

– оцінити конструкційно-технологічні схеми та режими роботи перистальтичних насосів з метою встановлення наступних шляхів удосконалення;

– встановити вплив геометричних параметрів робочих органів та технологічних режимів роботи на продуктивність перистальтичного вакуумного насоса;

– встановити раціональну структурно-функціональну схему та конструкційні параметри удосконаленого перистальтичного вакуумного насоса за умови мінімальних втрат вакуумметричного тиску;

– визначити ефективність удосконаленого перистальтичного вакуумного насоса.

**Об’єкт дослідження** – конструкційно-технологічні параметри перистальтичного вакуумного насоса та їх вплив на рівень та стабільність вакуумметричного тиску.

**Предмет дослідження** – залежності та режими функціонування перистальтичного вакуумного насоса для малогабаритної доїльної установки.

**Методи досліджень.** В основу теоретичних досліджень покладено методи чисельного моделювання при використанні теорії математичного моделювання, основних положень теорії деформування гнучких трубопроводів, використання аналітичного опису процесу деформування під дією прикладених зусиль, використання законів термодинаміки, використання методів 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 внутрішньовузівських міжфакультетських та міжнародній конференціях, відображені у наступних друкованих працях:

1. Боньковський О. Ю. Оцінка конструкційних особливостей перистальтичних насосів. *Наукові читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 20 травня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 31–33

2. Медведський О. В., Боньковський О. Ю. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів перистальтичного вакуумного насоса. *Біоенергетичні системи* : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: Поліський національний університет, 2021. Том 2. С. 25–26.

3. Медведський О. В., Боньковський О. Ю. Шляхи удосконалення перистальтичних насосів. *Студентські читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 15 листопада 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 9–11

**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 32 сторінках загального обсягу машинописного тексту, проілюстровано 10 рисунками.

## РОЗДІЛ 1

### ОЦІНКА ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО ТИПУ

#### 1.1. Загальна характеристика перистальтичних насосів

Перистальтичний насос належить до насосів об'ємної дії. Насоси такого типу складаються із корпусу 1, трубки із еластичного матеріалу 2 та робочого органу 3 у вигляді пари роликів чи будь-якого конструкційного рішення витискувального пристрою (рис. 1.1) [4, 5].

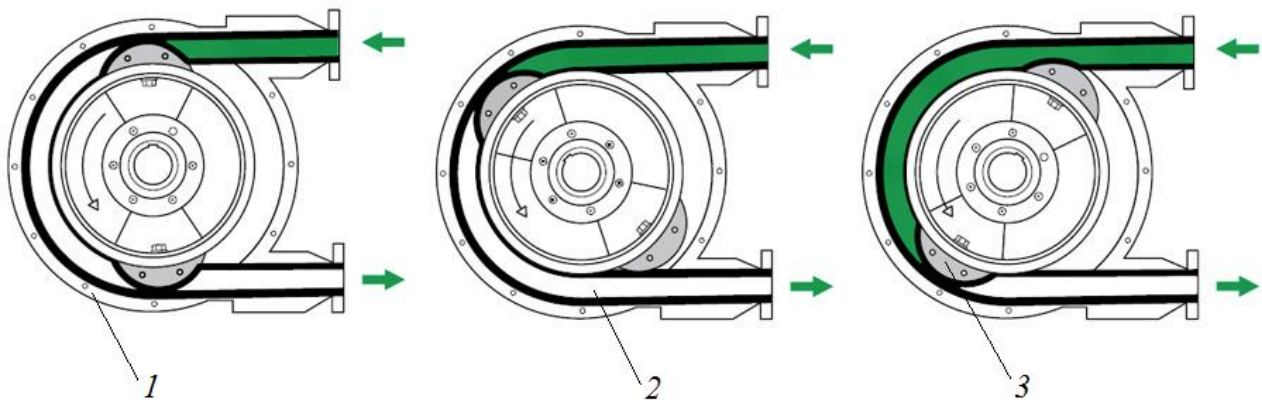


Рис. 1.1. Схема принципу роботи перистальтичного насоса: 1 – корпус; 2 – гнучка трубка; 3 – ротор із робочими виступами [5].

Принцип роботи перистальтичного насоса полягає в тому, що переміщення середовища відбувається за допомогою натискних виступів ролика. Еластична трубка звільняючись від натискного виступу ролика, повертається у початковий стан. При цьому різко збільшується внутрішній об'єм трубки, що спонукає до виникнення вакууму. У порожнину з низьким тиском надходить порція повітря із вакуумної мережі доїльного апарата. Цикл роботи повторюється при кожному натисканні та відновленні форми еластичного трубчатого елементу насоса [6].

Переваги перистальтичних насосів визначаються наступним [7, 8]:

- простота конструкції, низькі експлуатаційні видатки, низьковитратне сервісне обслуговування, спрощений ремонт;
- відсутність ризику забруднення середовища, оскільки робочі органи взаємодіють із середовищем через еластичну герметичну трубку, що дозволяє використовувати такий насос для перекачування агресивних середовищ;
- відсутній негативний вплив перистальтичного насоса на навколишнє середовище і навпаки;
- еластична робоча трубка – єдиний елемент, який зношується та потребує періодичної заміни з мінімальною трудомісткістю виконуваної операції;
- здатність перистальтичного насоса працювати у зворотному режимі, тобто, при заміні всмоктувального патрубка на нагнітальний і навпаки, що можна використати під час самоочищення;
- відносна безшумність роботи під час експлуатації;
- робоче середовище подається рівномірно, з достатньою точністю та плавністю потоку;
- характерна властивість перистальтичного насоса до самовсмоктування, що забезпечує можливе його застосування для піднімання рідини із глибини 9 метрів у системах водопостачання;
- безпроблемний сухий пуск, у випадку відсутності робочого середовища у порожнині еластичної трубки;
- можливість зміни еластичної трубки без розбирання насоса;
- простота в очищенні та налаштуванні насоса;
- відсутність у конструкції ущільнень, клапанів, мембранних пристроїв, сальників та інших елементів, котрі досить швидко виходять із ладу та потребують контролю та заміни, що значно знижує експлуатаційні видатки.

До недоліків перистальтичних насосів належать [6, 7]:



- температурні обмеження та обмеження за тиском під час роботи, що пов'язано з матеріалом еластичного робочого органу;
- обмежені галузі застосування перистальтичних насосів;
- можна отримати пульсуючий потік середовища, особливо це спостерігається за умови недостатньої частоти обертання ротора;
- гнучка трубка потребує якісного моніторингу її стану та вчасної заміни.

Таким чином, перистальтичні насоси мають як конструкційні так і експлуатаційні переваги перед ротаційними пластинчастими вакуумними насосами, котрі найбільш поширені у вакуумних системах доїльних установок.

## **1.2. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів перистальтичних насосів**

Принцип функціонування вакуумних насосів перистальтичного типу полягає у зміні об'єму робочого тіла за допомогою ролика шляхом впливу на гнучкий шланг, який кріпиться на внутрішній стороні корпусу насоса. При цьому він відіграє роль статора (рис. 1.2) [9, 10].

Простота конструкції перистальтичних вакуумних насосів обумовила їх досить широке поширення. Насоси такого типу не мають клапанів, а відповідно і клапанно-розподільного механізму. Використовується тільки тертя кочення, тому знижується потреба у мастильних засобах. Низький рівень шуму такого насоса позитивно впливає на фізіологічний стан тварин під час машинного доїння. В наслідок цього підвищується комфортність тварин та виникають передумови до повного виведення утвореного у вимені корови молока [11]. Ця особливість безшумності роботи найбільш імпонує для індивідуальних доїльних установок, котрі використовуються у господарствах населення та невеликих фермерських господарствах. Окрім цього зручність в експлуатації, обслуговуванні та ремонті розширює межі використання насоса даного типу.

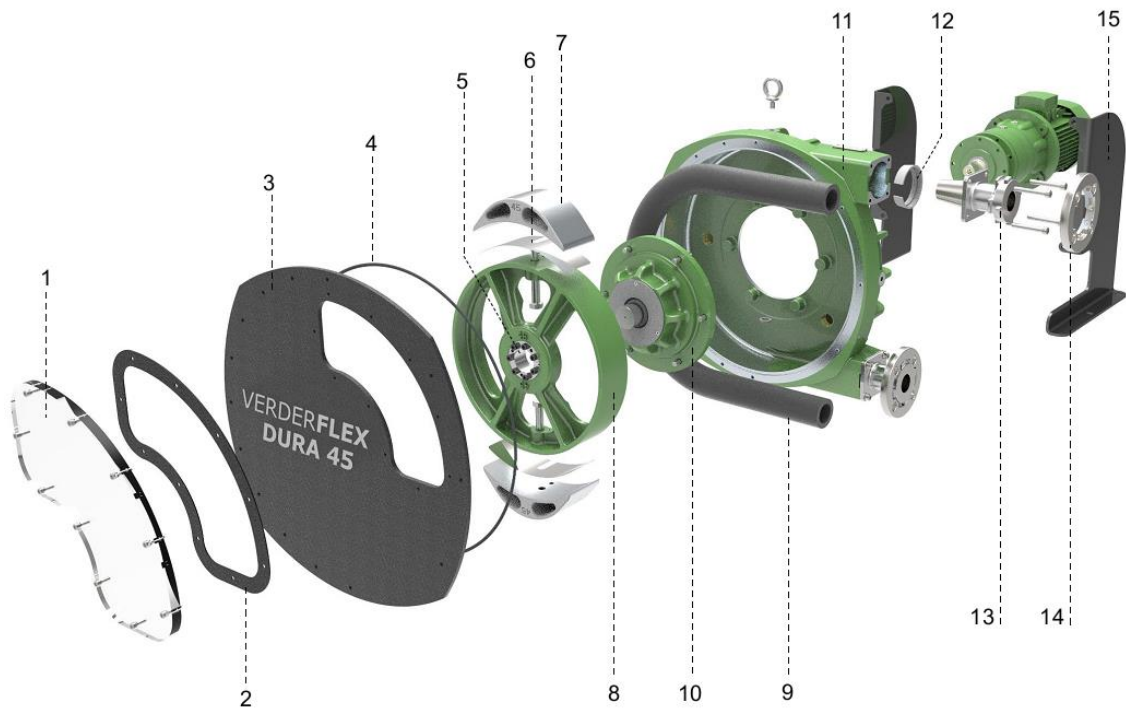


Рис. 1.2. Будова перистальтичного насоса [10]: 1 – оглядове вікно; 2 – ущільнювальна прокладка; 3 – кришка передня; 4 – кільце ущільнювальне; 5 – підшипник ковзання; 6 – проставка; 7 – виступ ротора; 8 – ротор; 9 – гнучкий шланг; 10 – корпус підшипника; 11 – корпус; 12 – кільце затискне; 13 – муфта; 14 – фланець обертовий; 15 – рамка

Натомість, використання перистальтичних насосів для створення вакуумметричного тиску є відносно новим технічним рішенням. Тому, необхідно адаптувати конструкцію таким чином, щоб задовольнити наступні вимоги до вакуумних насосів доїльної установки [12]:

- для стабільної роботи доїльного обладнання необхідно у вакуумній системі створити робоче розрядження не нижче ніж 34,6 кПа і не вище за 53,3 кПа, при цьому коливання тиску не повинні перевищувати 2,66–6,65 кПа;
- зміна температури нагріву деталей насоса не повинен впливати на продуктивність насоса, при цьому вона повинна бути незмінною протягом процесу машинного доїння корів;
- конструкція насоса повинна забезпечити його надійний запуск у роботу, незалежно від температури навколишнього середовища;

- насос не повинен містити деталі, котрі швидко спрацьовуються та вимагають частої заміни;
- система мащення насоса має бути простою і надійною за конструкцією, а краще, коли вона взагалі не потрібна;
- насос не повинен створювати надмірного шуму під час роботи, низька металоємність сприяє зниженню показника шумності;
- за номінального вакуумметричного тиску насос повинен забезпечувати оптимальні показники роботи доїльної установки та мати деякий резерв продуктивності.

Параметри та технологічні режими роботи перистальтичних насосів недостатньо добре вивчені, тому виникає потреба у подальших досліджень, при цьому конструкція та принцип роботи самого насоса не можуть вважатись досконалими.

### **1.3. Висновки до розділу 1**

1. Виконана оцінка вказала на ряд переваг перистальтичних насосів порівняно із ротаційними пластинчастими вакуумними насосами. Це, в першу чергу, стосується значно меншою шумністю роботи, а незначні габарити забезпечать їх використання для мобільних доїльних установок.

2. Встановлено, що недостатньо обґрунтованими є наступні параметри перистальтичного вакуумного насоса: конструкційно-геометричні розміри, співвідношення діаметрів корпусу, роликів і шлангів, особливості їх приводу, закономірності взаємодії робочих органів та потоку повітря. Все це свідчить про необхідність проведення додаткових досліджень для обґрунтування конструкційних параметрів та режимів роботи перистальтичного вакуумного насоса, особливо для умов мобільних індивідуальних доїльних установок.

## РОЗДІЛ 2

### УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕСТАЛЬТИЧНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

#### 2.1. Обґрунтування конструкції удосконаленого перистальтичного вакуумного насоса

Під час обертання ротора ролики перекочуються поверхнею еластичної трубки, при постійному та щільному притисканні її у точці контакту з роликом. У зв'язку з цим в процесі обертання ролика об'єм порожнини камери еластичної трубки за роликом збільшується, тому, в наслідок виникнення низького тиску, всмоктується повітря. Одночасно об'єм порожнини камери еластичної трубки перед роликом зменшується, втискаючи повітря з системи. Після цього ролик, стискаючи еластичну оболонку перекочується у напрямку всмоктувального отвору, проходить повз нього, внаслідок чого камера еластичної трубки поділяється роликом на дві частини. Процес повторюється із заданою частотою обертання ротора (рис. 2.1) [5, 13].

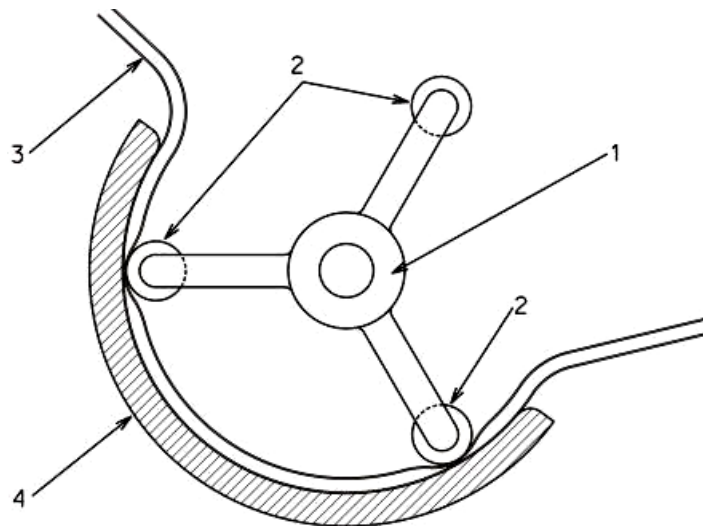


Рис. 2.1. Схема роботи роликового перистальтичного вакуумного насоса:  
1 – ротор; 2 – ролик; 3 – гнучка трубка; 4 – корпус [5, 13].

Продуктивність перистальтичного вакуумного насоса можна встановити на основі відомих залежностей [11, 14] для систем об'ємного типу, за формулою:

$$S_{pn} = \frac{Q_{\Sigma}}{p_p} + \frac{V_m}{t_v}, \quad (2.1)$$

де  $Q_{\Sigma}$  – подача повітря у систему, м<sup>3</sup>/год;

$p_p$  – робочий вакуумметричний тиск, кПа;

$V_m$  – кількість отриманого молока за період доїння, м<sup>3</sup>;

$t_v$  – тривалість видоювання кількості  $V_m$  молока, с.

Внутрішній об'єм гнучкого трубопроводу перистальтичного вакуумного насоса має визначатись його діаметром та довжиною шляху який проходить ролик ротора за один робочий хід. При цьому варто брати до уваги загальні витрати потоку повітря доїльною установкою враховуючи техніко-економічні показники та фізико-механічні властивості матеріалів, котрі використовують при виготовленні насоса.

Відомо, що на гнучку трубку діють тиски як із внутрішнього так і зовнішнього боку. До зовнішніх впливів на шланг можна відзначити дію ролика ротора, який перетискає гнучку трубку на деякій його робочій довжині. Сукупність перерахованих факторів, а також конструкційні особливості насоса впливають на вибір довжини гнучкої трубки за умови відомого її внутрішнього діаметра [14].

Робочу довжину гнучкої трубки насоса можна визначити за допомогою залежності:

$$L = \pi \cdot \left( D_s - \frac{d_m}{2} \right) - l, \quad (2.2)$$

де  $D_s$  – діаметр внутрішньої порожнини статора насоса, м;

$d_m$  – зовнішній діаметр гнучкої трубки, м;

$l$  – довжина периметра статора, яка не дотикається до трубки, м.

Невикористана довжина поверхні периметра статора, в залежності від конструкції насоса, може мати досить широкий діапазон значень. У деяких конструкціях це значення взагалі може бути рівним нулю або мати незначну величину.

## 2.2. Визначення конструкційно-геометричних параметрів перистальтичного вакуумного насоса

У корпусі перистальтичного насоса можна паралельно розмістити декілька гнучких трубопроводів. В такому випадку, відповідно до [15, 16], при заданій продуктивності вакуумного насоса ( $S_{pn}$ ), відомому діаметрі гнучкої оболонки та відомому найменшому діаметрі барабана, кількість паралельних гнучких трубопроводів ( $z$ ) в одному корпусі можна визначити за формулою:

$$z = \frac{S_{pn}}{60 \cdot S_p \cdot n} = \frac{4}{\pi \cdot D_r \cdot d_p^2} \cdot \frac{S_{pn}}{60 \cdot n}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – частота обертання ротора насоса,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$D_r$  – діаметр огинання гнучким трубопроводом ротора насоса, м;

$d_p$  – внутрішній діаметр гнучкої трубки, м;

$S_p$  – продуктивність насоса із одним гнучким трубопроводом за один оберт ротора,  $\text{м}^3$ .

Параметри гнучкого шлангу мають важливе значення при реалізації технологічного процесу перистальтичного вакуумного насоса. Так, за умови вибору більшого діаметра еластичного шланга зростають геометричні розміри усіх складових насоса. По-перше збільшується діаметр роликів ротора, що в свою чергу викличе збільшення діаметра корпусу насоса, по-друге це може бути причиною вищих енергетичних витрат на привод. Якщо обрати занадто

малий діаметр еластичного трубопроводу, не отримаємо бажаної продуктивності вакуумного насоса, в наслідок цього виникне потреба у збільшенні частоти обертання ротора для досягнення бажаної подачі. Виникнуть підвищені навантаження (більша температура та напруження) на вакуумний насос, що негативно впливатиме на його надійність та тривалість міжсервісного використання. Тому, при удосконаленні насосів перистальтичного тиску необхідно оцінити вплив перелічених факторів на його показники роботи (рис. 2.2).

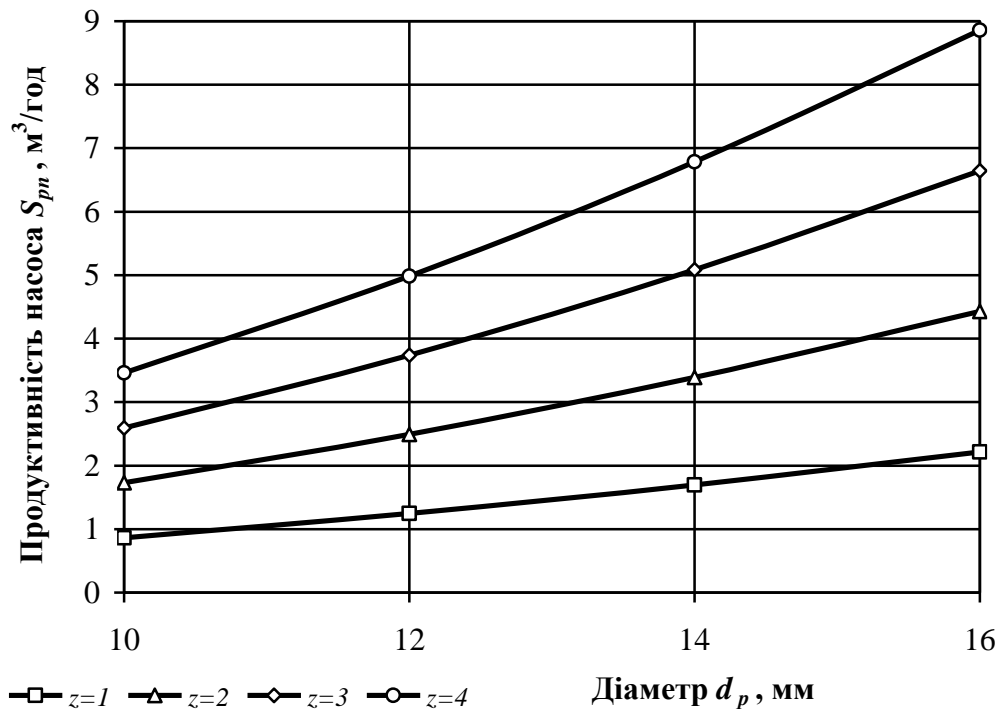


Рис. 2.2. Залежність продуктивності перистальтичного вакуумного насоса від внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу ( $d_p$ ) та їх кількості ( $z$ ) при частоті обертання ротора  $n=450 \text{ хв}^{-1}$  та обвідному діаметрі ротора  $D_r=130 \text{ мм}$ .

Відповідно до графічних залежностей на рис. 2.2, можна зробити висновок, що зі збільшенням внутрішнього діаметра еластичного трубопроводу зростає продуктивність перистальтичного вакуумного насоса. Причому, інтенсивність зростання продуктивності збільшується зі збільшенням кількості

паралельно працюючих гнучких шлангів. Так, при одному витку ( $z=1$ ) зі збільшенням діаметра від 10 до 16 мм продуктивність зростає на  $1,35 \text{ м}^3/\text{год}$ , при  $z=2$  – на  $2,7 \text{ м}^3/\text{год}$ , при  $z=3$  – на  $4,05 \text{ м}^3/\text{год}$ , при  $z=3$  – на  $5,4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Таким чином, резервом підвищення продуктивності перистальтичного вакуумного насоса є збільшення діаметра гнучкого трубопроводу та зростання кількості одночасно працюючих сегментів.

Слід звернути увагу, що збільшення частоти обертання ротора має впливати на зменшення габаритних розмірів внутрішньої порожнини корпусу насоса (рис. 2.3).

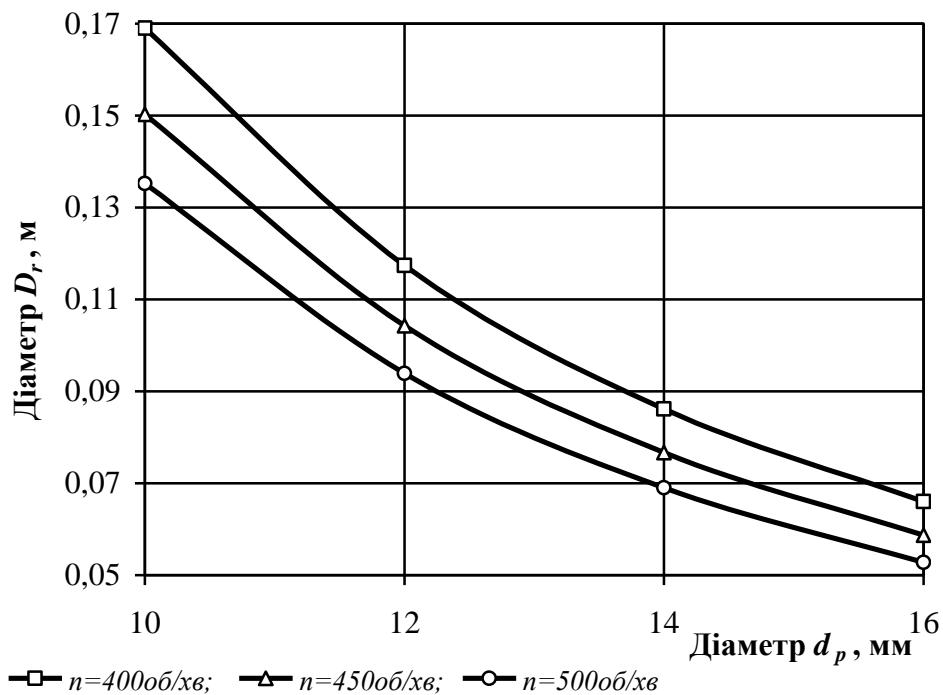


Рис. 2.3. Залежність діаметра огинання ротора ( $D_r$ ) від внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу ( $d_p$ ) відповідно до частоти обертання ротора за умови продуктивності перистальтичного вакуумного насоса на рівні  $S_{pn}=3 \text{ м}^3/\text{год}$  та кількості робочих контурів  $z=3$ .

Відповідно до графічних залежностей на рис. 2.3, внутрішній діаметр статора зменшується при зростанні частоти обертання ротора насоса від 400 до



500 об/хв., незалежно від внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу, на 20 %. Значний вплив на зменшення діаметра  $D_r$  має внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу  $d_p$  у всьому досліджуваному діапазоні частоти обертання ротора насоса. Так, при збільшенні діаметра еластичного робочого органу  $d_p$  насоса від 10 до 16 мм, внутрішній діаметр статора  $D_r$  зменшується на 41 %.

Таким чином, варіюючи геометричними параметрами перистальтичного вакуумного насоса можна отримати бажані технологічні показники роботи. Але отримані графічні залежності на рис. 2.2-2.3 не розкривають взаємозв'язок із режимними характеристиками вакуумної системи доїльної установки, зокрема рівня вакуумметричного тиску при необхідній подачі вакуумного насоса.

Від продуктивності вакуумного насоса залежить тривалість встановлення робочого вакуумметричного тиску у вакуумній системі [11, 17, 18] доїльної установки:

$$t = \frac{V}{k \cdot S_{pn}} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (2.4)$$

де  $V$  – об'єм вакуумної системи разом із місткістю для молока, м<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт, який враховує стан робочого середовища;

$p_1$  – початковий тиск у вакуумній системі (відповідає тиску оточуючого середовища), кПа;

$p_2$  – кінцевий тиск у вакуумній системі (відповідає рівню робочого абсолютного тиску), кПа.

Залежність (2.4) вказує, що основним резервом скорочення тривалості створення бажаного вакуумметричного тиску у вакуумній системі доїльної установки є збільшення продуктивності вакуумного насоса, оскільки вищому рівню робочого вакуумметричного тиску відповідає більш триваліший процес.

Аналізуючи розглянуті вище дослідження щодо перистальтичних вакуумних насосів, варто відмітити, що параметри та технологічні режими

роботи недостатньо вивчені. Тому, встановлення раціональних конструкційних та технологічних параметрів перистальтичного вакуумного насоса є актуальною проблемою, яка потребує вирішення.

### 2.3. Висновки до розділу 2

1. Проведені дослідження вказали на можливість підвищення ефективності функціонування перистальтичних вакуумних насосів, як складова вакуумної системи малогабаритної доїльної установки, за рахунок обґрунтування конструкційних параметрів та режимів роботи.

2. Встановлено, що зі збільшенням внутрішнього діаметра еластичного трубопроводу зростає продуктивність перистальтичного вакуумного насоса незалежно від кількості робочих контурів. При більшій кількості паралельно працюючих гнучких трубопроводів інтенсивність підвищення подачі значно вища.

3. Доведено, що значний вплив на зменшення обвідного діаметра ротора  $D_r$  чинить внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу  $d_p$ . При використанні діаметра еластичного робочого органу в діапазоні  $d_p=10-16$  мм внутрішній діаметр статора зменшується на 41 % незалежно від частоти обертання ротора насоса.

### РОЗДІЛ 3

## ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА ВАКУУМНОГО НАСОСА

### 3.1. Дослідження процесу роботи удосконаленого перистальтичного вакуумного насоса вакуумного насоса

Запропонована конструкція перистальтичного вакуумного насоса (рис. 3.1) відрізняється від відомих конструкційних рішень, оскільки використовується принцип розтягу-стиску гнучкого трубопроводу під дією роликів. Окрім цього, кожна секція герметично відокремлені одна від одної, а сполучення відбувається через регулювальний клапан.

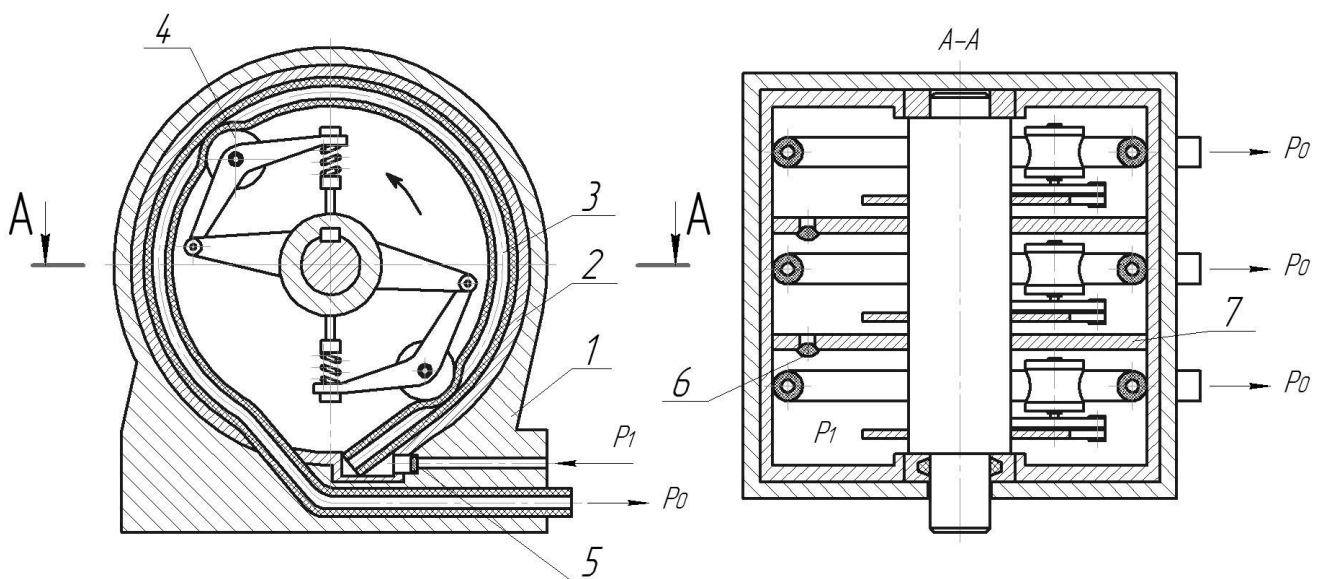


Рис. 3.1. Структурна схема розробленого перистальтичного вакуумного насоса мобільної доїльної установки: 1 – корпус; 2 – статор; 3 – гнучкий трубопровід; 4 – ролик; 5 – зворотний клапан; 6 – регулювальний клапан 7 – міжсекційна перетинка.

Принцип роботи запропонованого вакуумного насоса перистальтичного типу полягає в наступному. Ролики 4 під дією пружини стискають гнучкий

трубопровід 3, який, таким чином, поділяється на дві порожнини. Під час обертання ротора ролики перекочуються по поверхні гнучкого шланга, щільно притискаються до нього завдяки дії сили пружин та упору статора 2. При обертанні ролики проти годинникової стрілки, об'єм гнучкого трубопроводу за ним збільшується, що викликає зниження тиску і, в наслідок цього, до даної ділянки засмоктується повітря. Одночасно, повітря яке знаходиться перед роликом видаляється із системи оскільки об'єм цієї частини гнучкого трубопроводу зменшується. Ролик, який пройшов повен, оберт перекочується на всмоктувальну ділянку еластичного трубопроводу – процес роботи повторюється з періодичністю, яка відповідає частоті обертання ротора.

Особливість розробленого перистальтичного вакуумного насоса полягає в тому, що вакуумметричний тиск, який створюється за допомогою роботи системи ролик-гнучкий трубопровід в порожнині еластичної трубки, поширюється у порожнину секції насоса. Оскільки тиск всередині і зовні гнучкого трубопроводу однаковий, зменшуються вимоги до товщини його стінок, що в кінцевому випадку сприяє покращенню умов деформації під час перекочування ролика.

При використанні тонкостінного еластичного трубопроводу використовується менше зусилля деформації, зменшується сила тертя і, як наслідок, температура нагрівання, що позитивно впливатиме на термін експлуатації перистальтичного насоса в цілому. За умови меншої товщини стінок при однаковому зовнішньому діаметрі гнучкого трубопроводу зростає внутрішній об'єм, що є резервом підвищення продуктивності вакуумного насоса. Сукупність вказаних удосконалень буде сприяти зниженню енергоємності роботи вакуумного насоса порівняно із насосами аналогічних конструкційно-технологічних параметрів.

Кожна секція розробленого вакуумного насоса виконує функцію невеликого вакуумного балона, що позитивно впливатиме на стабільність вакуумметричного тиску із-за відсутності коливань тиску, який

регламентується періодичною роботою роликів при переході із режиму всмоктування до режиму витиснення повітря за межі насоса.

Внутрішні порожнини розробленого насоса сполучаються між собою за допомогою регулювального клапана 6 (рис. 3.1). При досягненні необхідного рівня вакуумметричного тиску в одній секції насоса, відкривається регулювальний клапан, який сполучає першу порожнину з другою, а за умови досягнення бажаного тиску поєднується і третя порожнина. Такий підхід дає можливість досягнути бажаного рівня вакуумметричного тиску у кожній складовій мобільної доїльної установки – для вакуум-проводу, для молочного проводу і для інших складових. Для цього до конкретної секції необхідно приєднувати відповідні складові, або використовувати створений вакуумним насосом сукупний вакуумметричний тиск з наступним його регулюванням за допомогою диференційного вакуумного регулятора .

Таким чином, бажаний рівень вакуумметричного тиску підтримується за допомогою регулювальних клапанів 6 (див. рис. 3.1), а для забезпечення системи від неконтрольованого зростання тиску використовується запобіжний (зворотний) клапан, який розміщений у нагнітальній частині гнучкого трубопроводу.

Загальну продуктивність розробленого вакуумного насоса можна визначити з врахуванням рекомендацій [11, 16, 19, 20] та отриманих залежностей (2.1–2.3) за допомогою формули:

$$Q_{pn} = 60 \cdot \left\{ \left[ \pi \cdot \left( D_s - \frac{d_p}{2} \right) - l - l_r \right] \cdot \left[ \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \right] \cdot \left( 1 - \frac{V_1}{m_r \cdot V_2} \right) \right\} \cdot n, \quad (3.1)$$

де  $m_r$  – кількість робочих роликів в порожнині насоса, шт.;

$n$  – частота обертання ротора, об/хв.;

$l$  – довжина ділянки статора яка не використовується під час технологічного процесу відкачування повітря, м;

$l_r$  – робоча довжина гнучкого трубопроводу, м;

$V_1$  – об’єм стисненої ділянки гнучкого трубопроводу перед роликом, м<sup>3</sup>;

$V_2$  – об’єм стисненої ділянки гнучкого трубопроводу за роликом, м<sup>3</sup>;

$D_s$  – внутрішній діаметр статора, м;

$d_p$  – внутрішній діаметр гнучкої трубки, м.

В отриманій формулі (3.1), на відміну від використання серійних перистальтичних насосів, відсутня складова, яка враховувала деформацію гнучкого трубопроводу під дією різниці тисків зовні та всередині. Це дозволяє отримати вищу продуктивність розробленого насоса.

### **3.2. Встановлення режимних характеристик розробленого перистальтичного вакуумного насоса**

Під час проведення досліджень параметрів роботи розробленого перистальтичного насоса забезпечували варіювання наступних параметрів:

- внутрішній діаметр статора змінювали в межах від 140 до 152 мм з кроком у 4 мм;
- діаметр ротора приводу роликів змінювався в межах від 120 до 130 мм з кроком у 5 мм;
- внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу підбирали з кроком в 1 мм з параметрами від 10 до 16 мм;
- діаметр робочих роликів також змінювали в межах від 16 до 18 мм з кроком у 1 мм;
- частота обертання ротора вибиралась з врахуванням аналогічних значень для серійних насосів, змінювалась в межах від 400 до 500 об./хв.;
- рівень вакуумметричного тиску змінювався в межах від 42 до 48 кПа з кроком у 2 кПа.

Перед початком роботи розроблений вакуумний насос виводився у робочий діапазон протягом 10–15 хв. Це потрібно для підтримання постійної робочої температури, яка впливає на параметри повітря.

Головним параметром який характеризує будь-який вакуумний насос є його продуктивність – кількість відкоченого повітря за одиницю часу. В попередніх розділах відмічалось, що продуктивність перистальтичного насоса, як будь-якого насоса об'ємного принципу дії, залежить від його конструкційно-геометричних параметрів та режиму роботи, зокрема частоти обертання ротора.

Відповідно до отриманої залежності (3.1), продуктивність насоса прямопропорційна сукупному внутрішньому об'єму гнучкого трубопроводу (рис. 3.2), який залежить від його довжини відповідно до внутрішнього діаметра статора.

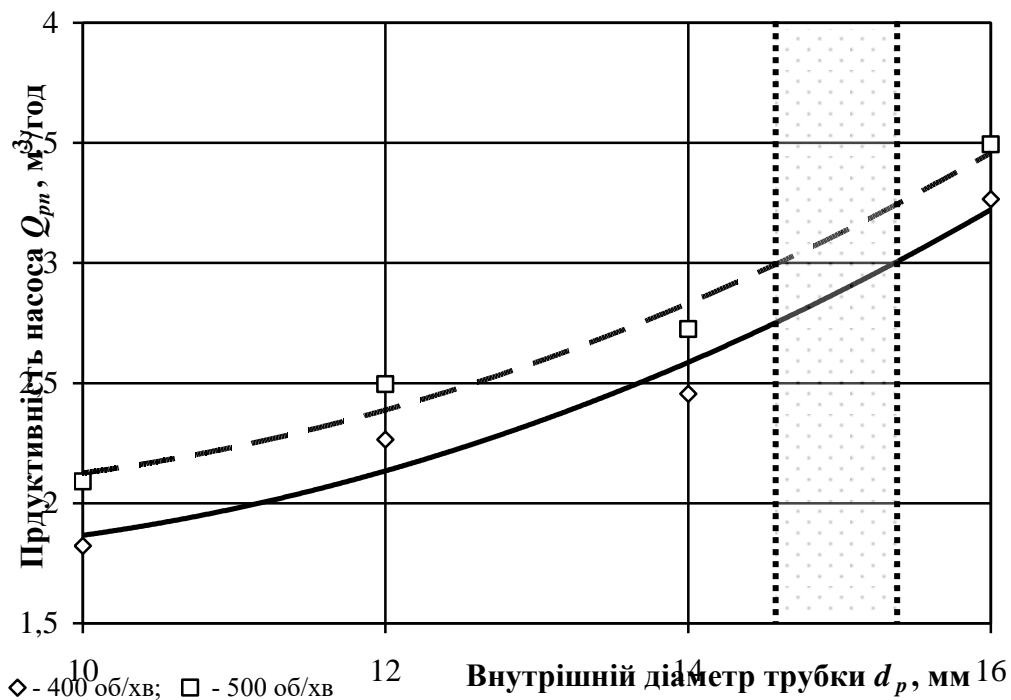


Рис. 3.2. Графік залежності продуктивності перистальтичного вакуумного насоса ( $Q_{pn}$ ) від внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу ( $d_p$ ) та частоти обертання ротора ( $n$ ).

В результаті проведених досліджень отримали залежності продуктивності розробленого перистальтичного вакуумного насоса від двох факторів –

внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу та частота обертання ротора. З графічних залежностей (рис. 3.2) походить, що зі збільшенням внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу від 10 до 16 мм продуктивність розробленого насоса зростає на 40–44 % незалежно від частоти обертання ротора. Але, зі збільшенням частоти обертання ротора з 400 до 500 об/хв. спостерігається збільшення продуктивності вакуумного насоса на 12,7 % для діаметра  $d_p=10$  мм і на 6,5 % для діаметра  $d_p=16$  мм. відповідно до рис. 3.2, для досягнення бажаної продуктивності перистальтичного насоса на рівні  $3 \text{ м}^3/\text{год}$  внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу має становити не менше 15 мм для вибраного діапазону частоти обертання ротора.

Зі зміною діаметра гнучкого трубопроводу змінюються геометричні параметри інших складових розробленого вакуумного насоса перистальтичного типу (рис. 3.3).

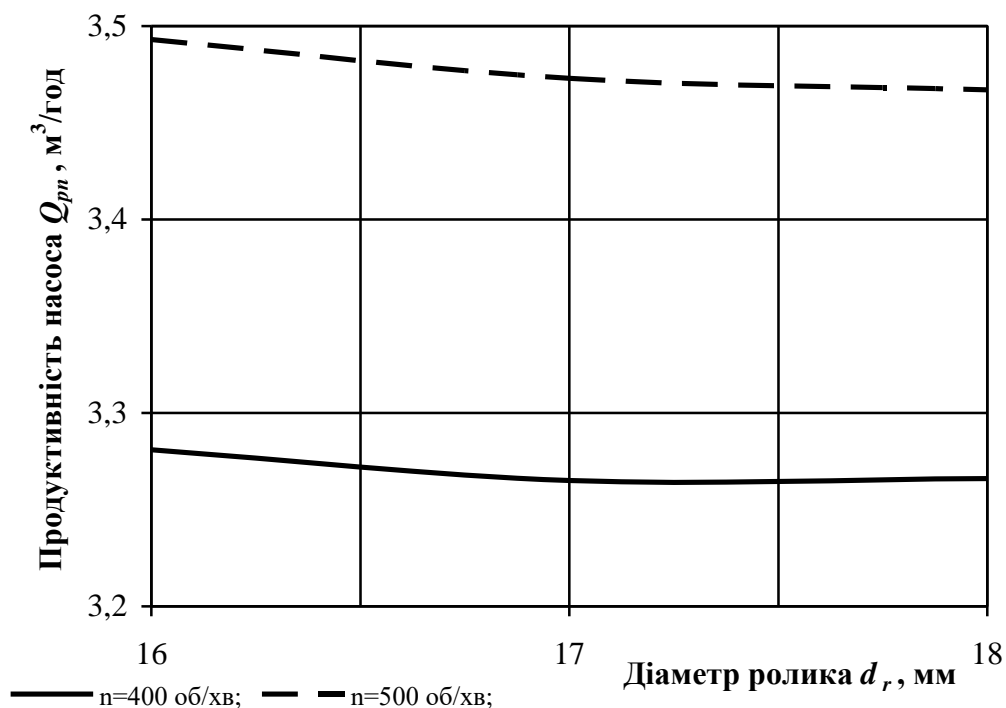


Рис. 3.3. Графік залежності продуктивності перистальтичного вакуумного насоса ( $Q_{pn}$ ) від зовнішнього діаметра ролика ( $d_r$ ) та фіксованої частоти обертання ротора ( $n$ ).



Як видно із графічних залежностей на рис. 3.3., діаметр ролика несуттєво впливає на продуктивність розробленого насоса. Так, при збільшенні діаметра ролика продуктивність знижується лише на 0,5 %. Частота обертання має більш суттєвий вплив на продуктивність, зокрема при  $n=500$  об/хв. продуктивність насоса збільшується в середньому на 6 %, порівняно із  $n=400$  об/хв.

Таким чином, вибирати варто більший діаметр ролика, оскільки сили притискання до оболонки будуть меншими, а це може позитивно вплинути на енергоємність процесу.

На ефективність технологічного процесу машинного доїння корів впливає рівень та стабільність вакуумметричного тиску, який створює насос (рис. 3.4).

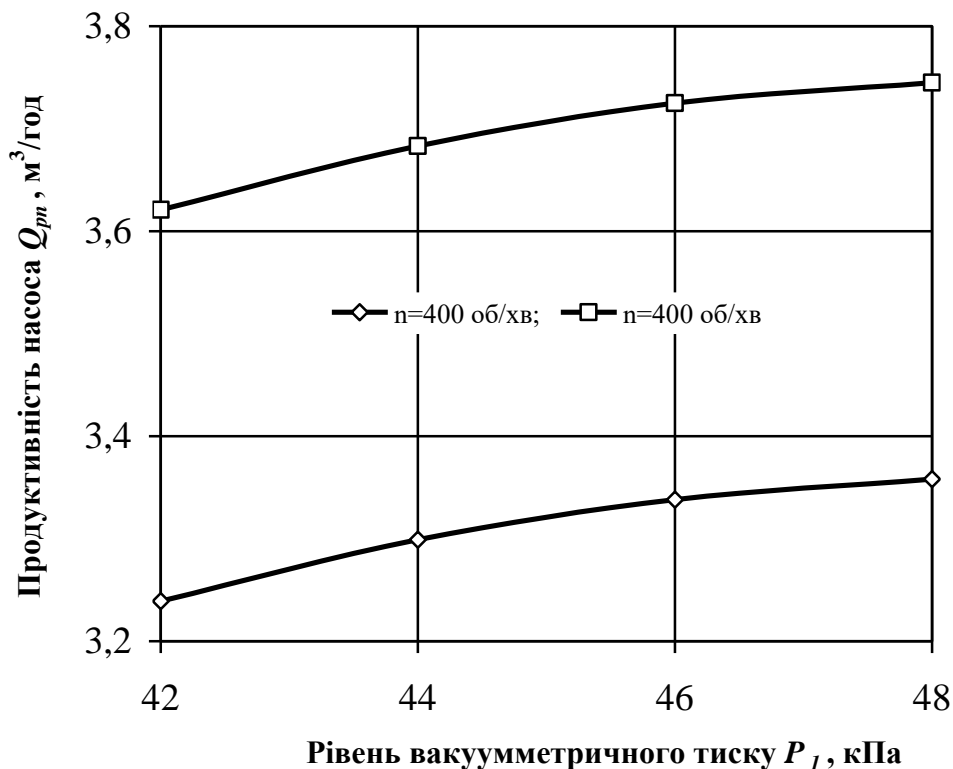


Рис. 3.4. Графік залежності продуктивності перистальтичного вакуумного насоса ( $Q_{pn}$ ) від рівня вакуумметричного тиску в порожнині секції ( $p_1$ ) та фіксованої частоти обертання ротора ( $n$ ) при робочому вакуум метричному тиску доїльного апарата 45 кПа.

Як видно з графічних залежностей (рис. 3.4), зростання вакуумметричного тиску в порожнині насоса призводить до несуттєвого підвищення продуктивності вакуумного насоса (на 3,4–3,7 %). Це можна пояснити тим, що за рахунок різниці тисків несуттєво збільшується об'єм внутрішньої порожнини гнучкого трубопроводу, що і визначає зростання об'єму видаленого із системи повітря. Значно суттєвіше на зростання продуктивності вакуумного насоса (на 11,5–11,8 %) чинить частота обертання ротора.

Так як, перистальтичний насос має об'ємний принцип дії, на його продуктивність має впливати габарити внутрішньої порожнини статора (рис. 3.5).

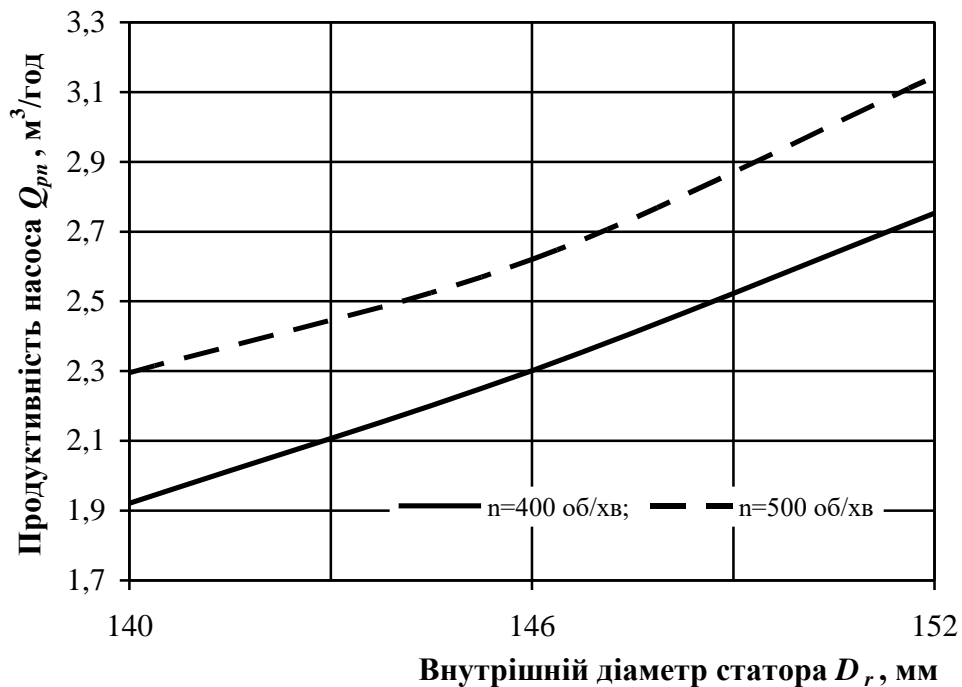


Рис. 3.5. Графік залежності продуктивності перистальтичного вакуумного насоса ( $Q_{pn}$ ) від внутрішнього діаметра статора ( $D_s$ ) та фіксованої частоти обертання ротора ( $n$ ) при внутрішньому діаметрі гнучкого трубопроводу  $d_p=15$  мм.

При збільшенні внутрішнього діаметра статора від 140 до 152 мм (рис. 3.5) збільшується на 37–43 % продуктивність насоса. Відбувається це тому, що

зростає робоча довжина гнучкого трубопроводу, тобто збільшується об'єм повітря який видаляється із системи за один оберт ротора. Частота обертання ротора у вибраному діапазоні не має суттєвого впливу на приріст продуктивності насоса (14–19 %).

Зі збільшенням геометричних параметрів складових насоса зростає потужність на привід ротора (рис. 3.6):

$$N_{pn} = \frac{10^4}{75 \cdot 60 \cdot \eta_p} \cdot V_{p1} \cdot \ln \frac{p_1}{p_0} = 0,001 \frac{Q_{pn} \cdot p_p}{\eta_p}, \quad (3.2)$$

де  $\eta_p$  – коефіцієнт, який враховує втрати на привід рухомих елементів розробленого насоса;

$p_p$  – робочий вакуумметричний тиск, кПа.

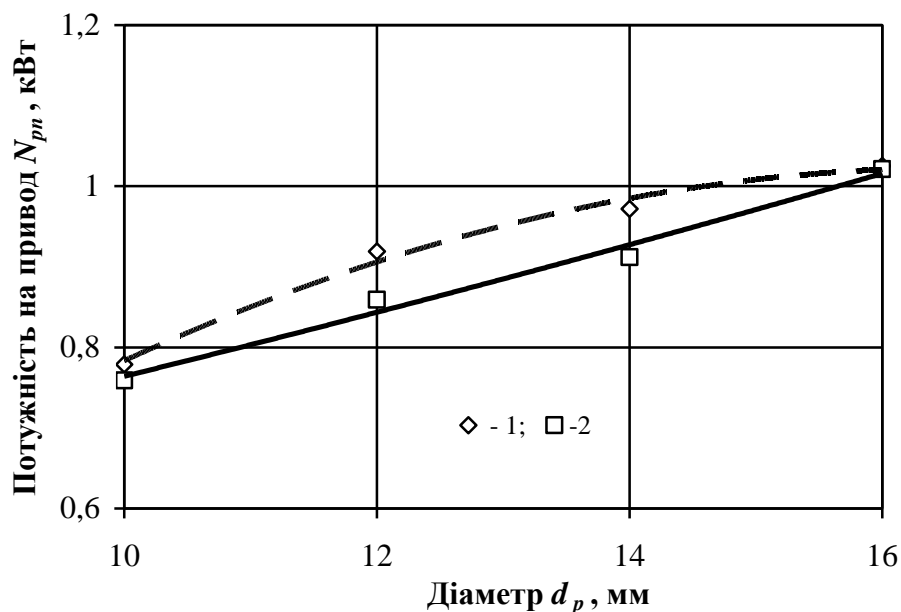


Рис. 3.6. Графік залежності потужності на привід перистальтичного вакуумного насоса ( $N_{pn}$ ) від внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу ( $d_p$ ) при частоті обертання ротора  $n=500$  об/хв., внутрішнього діаметра статора  $D_s=15$  мм та діаметрі ролика  $d_r=18$  мм: 1 – дані експериментальних досліджень; 2 – дані теоретичних досліджень.

Потужність на привод запропонованого перистальтичного вакуумного насоса, відповідно досліджень поданих на рис. 3.6, збільшується на 30 % зі збільшенням внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу від 10 до 16 мм. Це можна пояснити збільшенням втрат потужності на притискання ролика до поверхні гнучкого трубопроводу більшого діаметра, хоча опір при перекочуванні ролика по трубопроводі знижується.

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. Удосконалена конструкція перистальтичного вакуумного насоса складається із трьох розділених між собою секцій з регульованим клапаном між ними. Це дозволяє отримати бажаний рівень вакуумметричного тиску з мінімальними коливаннями, оскільки внутрішній простір насоса виконує функцію вакуумного балона.

2. При збільшенні внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу в діапазоні 10–16 мм зростає продуктивність розробленого вакуумного насоса на 40–44 %. Збільшення частоти обертання ротора від 400 до 500 об/хв. дозволяє отримати незначне зростання продуктивності вакуумного насоса на 6,5–12,7 %. Встановлено, що продуктивність перистальтичного насоса у 3 м<sup>3</sup>/год досягається при виборі гнучкого трубопроводу з внутрішнім діаметром не менше 15 мм.

3. Зростання рівня вакуумметричного тиску в порожнині перистальтичного вакуумного насоса несуттєво впливає на підвищення його продуктивності. При цьому збільшенням частоти обертання ротора до 500 об/хв. можна досягнути зростання продуктивності насоса на 12 % в досліджуваному діапазоні рівнів вакуумметричного тиску.

## ВИСНОВКИ

1. Перистальтичні вакуумні насоси мають значно меншу шумність під час роботи, що робить їх більш переважними для використання, як джерело вакууму, для індивідуальних доїльних установок. Встановлено, що серійні перистальтичні насоси мають ряд недоліків, які не дозволяють їх широко використовувати у системі машинного доїння корів. Тому обґрунтування конструкційних параметрів та режимів роботи перистальтичного вакуумного насоса є актуальним завданням.

2. Теоретичними дослідженнями доведена можливість підвищення ефективності функціонування перистальтичних вакуумних насосів для індивідуальних доїльних установок. Встановлено, що шляхом збільшення внутрішнього діаметра еластичного трубопроводу та кількості робочих контурів можна підвищити продуктивність перистальтичного вакуумного насоса. Шляхом теоретичних досліджень доведено, що при збільшенні внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу від 10 до 16 мм, можна зменшити на 41 % внутрішні габарити насоса, зокрема діаметр його статора.

3. Проведеними дослідженнями доведено вплив на продуктивність розробленого перистальтичного вакуумного насоса внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу та частоти обертання ротора. Так, при збільшенні внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу до 16 мм збільшується до 44 % продуктивність насоса, порівняно із діаметром у 10 мм. При цьому, збільшення частоти обертання ротора до 500 об/хв. призводить до збільшення продуктивності вакуумного насоса на 12,7 % порівняно із частотою обертання у 400 об/хв.

4. Діаметр ролика не має суттєвого впливу на продуктивність розробленого перистальтичного вакуумного насоса. Використання ролика збільшеного до 18 мм діаметра при частоті обертання  $n=500$  об/хв. дозволяє підвищити продуктивність насоса на 6 %, порівняно із  $n=400$  об/хв. Таким чином, ролик більшого діаметра більш прийнятний до використання оскільки

сили перекочування будуть меншими ніж при  $d_r=16$  мм. Встановлено, що збільшуючи діаметр статора до 152 мм можна отримати на 43 % вищу продуктивність розробленого вакуумного насоса, порівняно із діаметром у 142 мм. Це виникає оскільки із збільшенням діаметра статора збільшується робоча довжина гнучкого трубопроводу, що сприяє збільшенню подачі за один оберт ротора. Збільшення геометричних параметрів розробленого насоса призводить до зростання потужності на його привод. Так збільшення внутрішнього діаметра гнучкого трубопроводу від 10 до 16 мм викликає зростання потужності на 30 %.

5. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено оптимальні конструкційно-технологічні параметри розробленого перистальтичного вакуумного насоса: продуктивність насоса – 3 м<sup>3</sup>/год; рівень робочого – 45 кПа; внутрішній діаметр статора – 150 мм; діаметр роликів – 18 мм; внутрішній діаметр гнучкого трубопроводу – 16 мм; частота обертання ротора – 500 об/хв; кількість робочих контурів – 3 (відповідно три секції) з двома роликами на одну каретку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виробництво продукції тваринництва за видами : веб-сайт. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. 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.
3. Фролов Е. С., Автономова И. В., Васильев В. И. Механические вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
4. Боньковський О. Ю. Оцінка конструкційних особливостей перистальтичних насосів. *Наукові читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 20 травня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 31–33.
5. Перистальтичний насос : веб-сайт. URL : <https://wiki.tntu.edu.ua>.
6. Перистальтичні насоси : веб-сайт. URL : [https://www.debem.com.ua/ukr/nasos/peristalticheskie\\_nasosy/](https://www.debem.com.ua/ukr/nasos/peristalticheskie_nasosy/)
7. Перистальтичні насоси : веб-сайт. URL : <https://dalgakiran.ua/uk/products/perystaltychni-nasosy>.
8. Перистальтичні (шлангові) насоси BOMBAS BOYSER : веб-сайт. URL : <https://eximcomplekt.com.ua/product>.
9. Медведський О. В., Боньковський О. Ю. Шляхи удосконалення перистальтичних насосів. *Студентські читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 15 листопада 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 9–11
10. Перистальтичний шланговий насос : веб-сайт. URL : <https://www.verderflex.com/fileadmin/files/verderflex/documents/pdf>.
11. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика : монографія. К., 2008. 200 с.
12. Палій А. П., Палій А. П., Науменко О. А. Інноваційні технології та технічні системи у молочному скотарстві. Х., 2015. 323 с.

13. Медведський О. В., Боньковський О. Ю. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів перистальтичного вакуумного насоса. *Біоенергетичні системи : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*. Житомир: Поліський національний університет, 2021. Том 2. С. 25–26.

14. Хамеев В. М. Термодинамические процессы и параметрические характеристики вакуумных насосов. Новосибирск : Наука, 1986. 78 с.

15. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів: навч. посіб. / під ред. проф. П.М. Андренка. Х.: НТУ «ХП», 2014. 308 с.

16. Кононенко А. П. Об'ємні гідравлічні машини гідроприводів. Донецьк: ДонНТ, 2011. 292 с.

17. 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.

18. Мжелский Н. И. Вакуумные насосы для доильных установок. М. : Машиностроение, 1974. 151 с.

19. Вакуумная техника : справочник. / Фролов Е. С., и др. ; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М. : Машиностроение, 1992. 480 с.

20. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Теоретические основы вакуумной техники. М. : Энергоиздат, 1988. 340 с.