

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 637.125

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

СИЧ Андрій Михайлович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВСМОКТУВАЛЬНО-НАГНІТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РОТАЦІЙНО-
ПЛАСТИНЧАСТОГО 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., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Сич А. М. **Обґрунтування конструкційних параметрів всмоктувально-нагнітальної системи ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023 р.

У кваліфікаційній роботі виконано оцінку переваг та недоліків ротаційного пластинчастого вакуумного насоса для підвищення його ефективності у складі доїльної установки.

На підставі аналітичних досліджень отримано розрахункові залежності для визначення об'ємної подачі та необхідної потужності ротаційного вакуумного насоса з урахуванням зміни коефіцієнта подачі та провідності вхідного елемента. В результаті досліджень обґрунтовано основні конструктивні та режимні параметри вакуумного насоса та отримано аналітичні залежності для визначення ступеня впливу основних факторів на показники роботи насоса.

Вказано шляхи збільшення продуктивності та зниження потрібної потужності приводу силових агрегатів та забезпечення сталості вакуумного режиму доїльних установок. Побудовано математичну модель газодинамічних процесів.

Ключові слова: об'ємна подача, коливання тиску, потужність приводу, тиск нагнітання, стабільність вакууму

ANNOTATION

Sych A. M. **Justification of the design parameters of the suction-discharge system of a rotary-plate vacuum pump.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023

The qualification work evaluated the advantages and disadvantages of the rotary plate vacuum pump to increase its efficiency as part of the milking plant.

On the basis of analytical studies, calculated dependences were obtained for determining the volume supply and the required power of the rotary vacuum pump, taking into account the change in the supply coefficient and the conductivity of the input element. As a result of the research, the main design and operating parameters of the vacuum pump were substantiated and analytical dependencies were obtained to determine the degree of influence of the main factors on the performance of the pump.

Ways of increasing productivity and reducing the required drive power of power units and ensuring stability of the vacuum regime of milking units are indicated. A mathematical model of gas-dynamic processes has been constructed.

Key words: volume supply, pressure fluctuations, drive power, discharge pressure, vacuum stability

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК	7
1.1. Аналіз режимних характеристик вакуумних насосів об'ємної дії	7
1.2. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів вакуумного насоса	9
1.3. Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОТАЦІЙНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА	14
2.1. Вплив геометрії впускної та випускної системи вакуумного насоса на рівень провідності	14
2.2. Встановлення провідності різних форм впускного отвору вакуумного насоса	17
2.3. Висновки до розділу 2	22
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ВСМОКТУВАЛЬНО-НАГНІТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА РЕЖИМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО НАСОСА	23
3.1. Дослідження всмоктувально-нагнітальної системи ротаційного вакуумного насоса	23
3.2. Встановлення ефективності ротаційного вакуумного насоса за різних форм впускного отвору	24
3.3. Висновки до розділу 3	28
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Актуальність теми. Важливим фактором при підвищенні ефективності роботи доїльних установок та технології доїння загалом є підтримка сталості вакуумного режиму у технологічних лініях доїльних агрегатах різних модифікацій. Аналіз наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників [1-4] показав, що внаслідок недотримання заданих параметрів вакуумного режиму у молочних лініях зростає кількість захворювань корів маститом, порушується робота доїльних апаратів та інших вузлів доїльних установок, знижується продуктивність праці операторів та продуктивність тварин. Робота доїльних апаратів без порушення нормальних фізіологічних процесів у тварин можлива лише за певного розрідження, характерного для кожного модельного ряду та виконання за призначенням. Згідно з встановленими зоотехнічними нормами, величина розрідження в доїльному апараті повинна знаходитися в межах 42-53 кПа, коливання вакуумметричного тиску в будь-якому місці вакуум-проводу має бути не більше 3 кПа.

Стабільність та величина робочого розрідження, необхідна об'ємна витрата повітря для роботи сучасних доїльних установок визначається робочими параметрами вакуумного насоса та, в першу чергу, його об'ємною продуктивністю або, іншими словами, бажаною швидкістю.

Тому, для підтримки необхідного вакуумного режиму, а також підвищення ефективності процесу доїння виникла потреба у подальшому вдосконаленні вакуумних насосів та покращення показників їх роботи.

Мета і задачі досліджень. Метою дослідження є підвищення ефективності ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса за рахунок удосконалення конструктивно-технологічної схеми та оптимізації його параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- виконати аналіз технічних засобів для створення розрідження у доїльних установках;
- обґрунтувати найбільш перспективну та раціональну конструктивно-технологічну схему насоса, стосовно насосних агрегатів сучасних доїльних установок;
- виявити оптимальні параметри та режими роботи вакуумного насоса;
- встановити основні теоретичні залежності для визначення режимних та конструктивних параметрів;
- виконати дослідження для вивчення комплексного впливу основних факторів на вихідні параметри, дати техніко-економічну оцінку процесу оптимізації конструктивно-технологічних параметрів насоса

Об’єкт дослідження – ротаційний пластинчастий вакуумний насос доїльної установки.

Предмет дослідження – процес роботи ротаційного вакуумного насоса за різних конструктивно-технологічних параметрів.

Методи досліджень. У роботі використано аналітичний, експериментальний та розрахунково-конструктивний методи.

Аналітичний метод включав вивчення технологічного процесу із застосуванням методів аналогового моделювання, класичної механіки, термодинаміки та гідродинаміки системи програмних засобів з використанням персонального комп’ютера. Використовувалися методи фізичного моделювання для перевірки теоретичних положень та висновків.

Результати дослідження оброблялися із застосуванням відомих методів математичного аналізу з використанням програмного продукту, зокрема, 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. Сич А. М. Встановлення параметричних характеристик вакуумних насосів. *Студентські читання–2023* : матеріали науково-практичної

конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 36–38.

2. Медведський О. В., Сич А. М. Вплив геометрії впускної та випускної системи вакуумного насоса на рівень провідності. *Інженерні процеси та системи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 44–47.

3. Медведський О. В., Сич А. М. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів конструкційних елементів ротаційного вакуумного насоса. *Біоенергетичні системи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 36–38.

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 1 таблицею та 8 рисунками.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНИХ НАСОСІВ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

1.1. Аналіз режимних характеристик вакуумних насосів об'ємної дії

Найпоширенішими в даний час для доїльних установок вітчизняних та закордонних виробників є ротаційні вакуумні насоси пластинчастого типу. Насоси даного типу відрізняються простотою конструкції та технічного обслуговування, швидкохідністю, гарною врівноваженістю та плавністю роботи [1-4].

Проте відомо, що більшість цих машин недостатньо надійні в експлуатації і часто працюють зі зниженою продуктивністю. До недоліків таких насосів можна віднести порівняно низький механічний к.к.д., підвищену чутливість до порушення нормальних зазорів, недосконалість системи мастила, підвищений рівень шуму, знос пластин через нагрівання та тертя [1, 5-6].

З метою встановлення завад на досягненні даною технічною системою максимальної ефективності, розглянемо основні параметричні характеристики, котрі притаманні ротаційним вакуумним насосам.

Початковий (впускний) тиск вакуумної помпи ($P_{зан}$) – це максимальна величина тиску на вході у насос. При такому тиску починається процес роботи вакуумного насоса, тому, інколи початковий тиск називають тиском пуску насоса в роботу. Значення початкового тиску важливе для насосів, котрі починають свою роботу від тиску відмінного за атмосферний тиск. Це стосується вакуумних насосів які призначені для створення високого та надвисокого вакууму. У доїльних установках використовуються вакуумні насоси низького вакууму (таблиця 1.1). [7-9]

Максимальний випускний (P_e) тиск – це максимальний тиск у випускному патрубку вакуумного насоса за якого підтримується ефективна робота відповідно до технічної характеристики. Величина максимального тиску

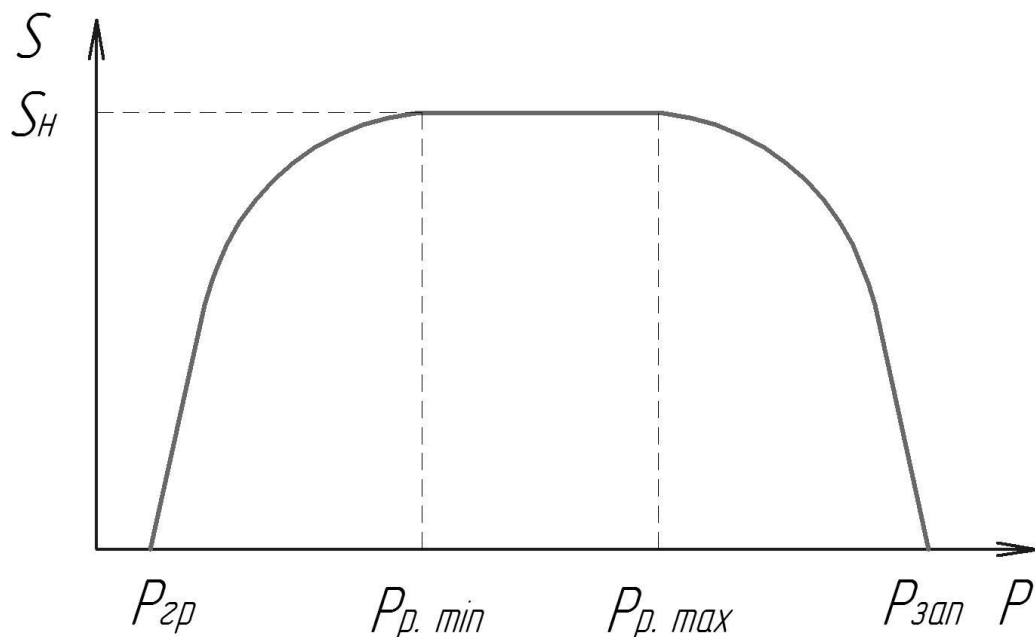
не повинна перевищувати заданий експлуатаційними даними насоса заводом-виробником. [7-9]

Таблиця 1.1

Характеристика рівня вакуумметричного тиску [10]

Величина виміру	Рівень вакууму			
	низький	середній	високий	надвисокий
Па	10^5-10^2	100-0,1	$0,1-10^{-5}$	$<10^{-5}$
мм.рт.ст	>1	$1-10^{-3}$	$10^{-3}-10^{-7}$	$<10^{-7}$

Основні характеристики вакуумного насоса з врахуванням його базових параметрів наведено на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Вплив рівня тиску (P) на швидкодію вакуумного насоса (S_H) [10]

Граничний тиск (P_{gr}) насоса – це мінімальне значення тиску, при якому насос може працювати без підключення об'єму для відкачування повітря.

Швидкодія вакуумного насоса прагне до нуля (рис. 1.1), якщо тиск наближається до граничного значення (якщо $P \rightarrow P_{gr}$, то $S_H \rightarrow 0$). [10-12]

Мінімальний тиск за якого насос тривалий час під час роботи забезпечує номінальне значення швидкодії називається найменшим робочим тиском

вакуумного насоса ($P_{p.min}$). Величина даного тиску майже на порядок перевищує значення граничного тиску. Експлуатувати вакуумний насос в діапазоні тисків від P_{zp} до $P_{p.min}$ економічно недоцільно. [10-12]

Найбільшим робочим тиском ($P_{p.max}$) називають максимальне значення тиску за якого вакуумний насос тривалий час під час роботи забезпечує номінальне значення швидкодії. Ефективне використання вакуумного насоса буде за умови дотримання діапазону робочих тисків від $P_{p.min}$ до $P_{p.max}$. При цьому, тиск пуску насоса в декілька разів перевищує робоче значення тисків. [10-12]

В процесі роботи вакуумного насоса на рівень вакуумного тиску та швидкодію впливають його конструкційні та геометричні параметри, які визначають втрати тиску у кожному елементі.

1.2. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів вакуумного насоса

Основним показником роботи вакуумного насоса є його об'ємна продуктивність. В загальному, продуктивність вакуумного насоса визначається потоком повітря яке проходить через впускний патрубок насоса за одиницю часу.

Величина об'ємної продуктивності вакуумних насосів визначається: [12]

$$Q_n = \eta_v \cdot Q_g \quad (1.1)$$

де η_v – коефіцієнт подачі насоса;

Q_g – геометрична продуктивність насоса, м³/год.

Геометрична продуктивність вакуумного насоса залежить від конструктивних параметрів та частоти обертання ротора. Її можна визначити з виразу: [13-15]

$$Q_z = 120 \cdot \pi \cdot e \cdot L \cdot D \cdot n \left(1 - \frac{\delta \cdot z}{\pi \cdot D} \right), \quad (1.2)$$

де e – ексцентриситет насоса, м;

L – довжина циліндра корпусу насоса, м;

D – діаметр циліндра корпусу насоса, м;

z – число пластин ротора, шт.;

n – частота обертання ротора насоса, хв^{-1} ;

δ – товщина пластини ротора, м.

Коефіцієнт наповнення (подачі) всмоктувальної камери насоса залежить від її конструктивного виконання та ступеня підвищення тиску у вихідному перерізі корпусу. Чим більше значення коефіцієнта подачі, тим вищу продуктивність вакуумного насоса можна отримати. Визначити коефіцієнт подачі можна за формулою: [13-15]

$$\eta_v = \frac{U \left(1 - \frac{P_{sp}}{P} \right)}{Q_z + U}, \quad (1.3)$$

де U – провідність структурного елемента вакуумного насоса, $\text{м}^3/\text{год}$.

Провідність елемента вакуумного насоса є оберненою величиною до опору переміщення повітря через структурний елемент. Це може бути отвір або патрубок, через взаємодію із яким потік повітря втрачає свою енергію та сповільнюється. Це визначається різницею тисків на початку руху потоку повітря та у кінцевому перерізі при завершенні переміщення потоку повітря.

Взаємозв'язок провідності будь-якого елемента конструкції вакуумного насоса із продуктивністю (U) можна описати рівнянням, $\text{м}^3/\text{год}$: [13-15]

$$U = \frac{Q_p}{P_2 - P_1}, \quad (1.4)$$

де P_1 – тиск на початку елемента, Па;

P_2 – тиск у кінці елемента, Па;

Q_p – потік повітря через елемент системи, Па×м³/год.

Якщо P_1 є тиском у впускному патрубку вакуумного насоса, то можна записати: [14-16]

$$Q_n = S_n \cdot P_1 = U(P_2 - P_1), \quad (1.5)$$

де S_n – швидкодія вакуумного насоса, м³×Па/год.

Ефективність функціонування вакуумного насоса оцінюють за допомогою коефіцієнта використання вакуумного насоса (рис. 1.2): [13-15]

$$K_n = \frac{U}{S_n + U}, \quad (1.6)$$

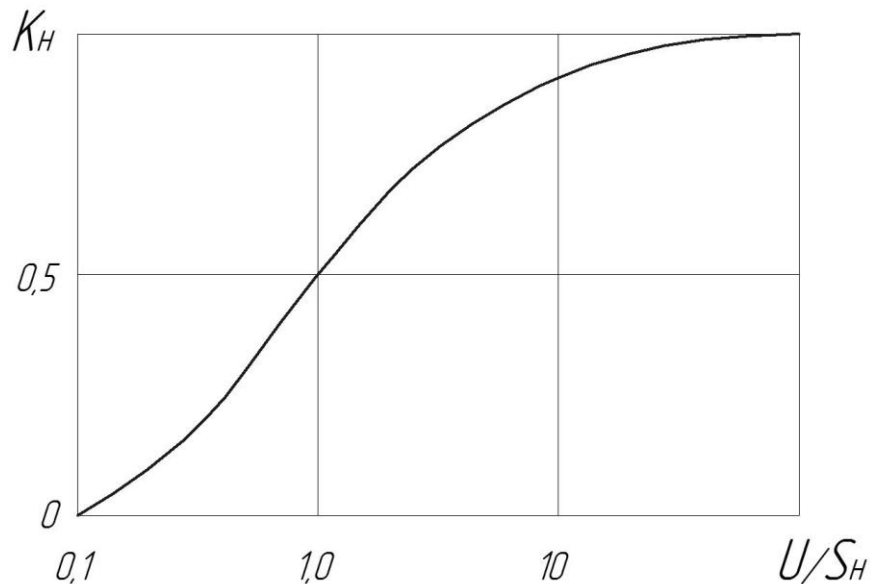


Рис. 1.2. Залежність коефіцієнта використання вакуумного насоса від співвідношення провідності до швидкодії насоса [13-15]

Відповідно до рис. 1.2, максимальне значення коефіцієнта використання вакуумного насоса може становити рівним одиниці.

Це впливає із залежності визначення коефіцієнта використання насоса:

$$K_n = \frac{S_0}{S_n}, \quad (1.7)$$

де S_0 – швидкодія відкачуваного об'єму, м³/год.

При збільшенні провідності елемента вакуумної системи до безмежності буде збільшуватись швидкодія відкачування елемента вакуумної системи до величини швидкодії вакуумного насоса, тобто:

$$\text{якщо } U \rightarrow \infty \text{ то } S_0 = \frac{Q}{P_2} \rightarrow S_n = \frac{Q}{P_1} \quad (1.8)$$

де P_1 – тиск на вході у вакуумний насос, Па;

P_2 – тиск на виході із відкачуваного об'єму, Па;

Q – потік повітря через елементи системи, Па×м³/год.

Якщо провідність вакуумної системи буде недостатньою, то це можна подати у вигляді запису:

$$\text{якщо } U \rightarrow 0 \text{ то } S_0 = 0 \quad (1.9)$$

Таким чином, збільшення провідності конструкційних елементів можна вважати резервом підвищення ефективності вакуумного ротаційного насоса. При цьому суттєве значення можуть мати форма та розміри конструкційних елементів через які проходить потік повітря до вакуумного насоса.

1.3. Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що найбільшого поширення для доїльних установок вітчизняних та закордонних виробників набули ротаційні вакуумні насоси пластинчастого типу. Це можна пояснити тим, що вакуумні насоси даного типу відрізняються простотою конструкції та технічного обслуговування, швидкохідністю, гарною врівноваженістю та плавністю роботи.

2. В процесі роботи вакуумного насоса на рівень вакуумного тиску та швидкодію впливають його конструкційні та геометричні параметри, які визначають втрати тиску у кожному елементі. За умови збільшення провідності конструкційних елементів можна підвищити ефективність вакуумного ротаційного насоса. При цьому важливо встановити оптимальну форму та геометричні розміри конструкційних елементів через які проходить потік повітря до вакуумного насоса.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОТАЦІЙНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

2.1. Вплив геометрії впускної та випускної системи вакуумного насоса на рівень провідності

У вакуумній техніці, розглядається кілька режимів течії газу. У нашому випадку стан повітря, що визначається критерієм Кнудсена ($K_n \leq 0,33$) відповідає низькому вакууму. Виходячи з цієї умови, відповідно до рекомендацій [13, 15] було розглянуто в'язкий режим переміщення повітряного потоку через елементи конструкції вакуумного насоса.

Основним параметром будь-якого прохідного елемента вакуумної системи є його провідність U , яка формується від ступеня вакууму на його початку та кінцевому перерізі. В якості перерізу вхідного та вихідного потоку повітря корпуса насоса є отвір, геометричні параметри якого впливають на втрати тиску [13, 15-16, 18]. Розглянемо два можливих варіанти конструкційних особливостей отворів (рис. 2.1).

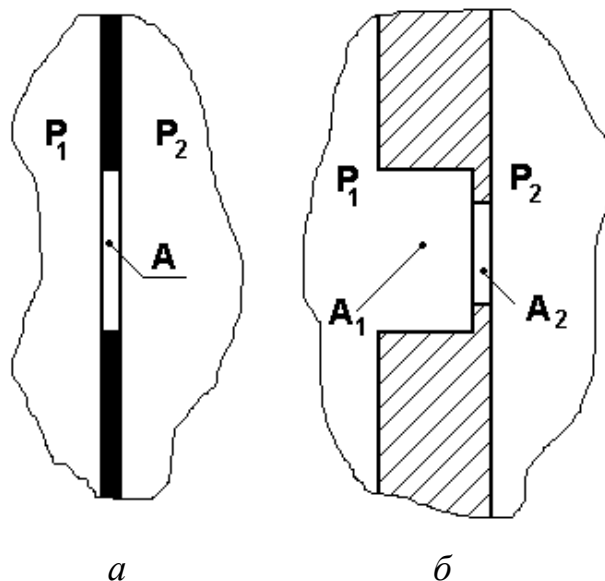


Рис. 2.1. Геометрична форма отворів: *a* – поєднання нескінченних об'ємів; *б* – поєднання нескінченного та обмеженого об'ємів

У першому випадку (рис. 2.1, *a*), як отвір розглянутий відрізок труби, при умові що довжина основи отвору становить $l \leq 0,01d$ (де d – діаметр отвору). Цей трубопровід розташований у стінці, що розділяє нескінченно великі об’єми елементів вакуумної системи.

Відповідно до рівняння нерозривності потоку: [8-9]

$$V = A \cdot v, \quad (2.1)$$

де V – об’ємний потік повітря через елементи системи, м³/с;

A – площа поперечного перерізу елемента системи, м²;

v – швидкість повітряного потоку на виході із отвору, м/с.

З врахуванням рівняння збереження енергії для адіабатного потоку повітря при врахуванні зміни його кінетичної енергії що супроводжується зміною ентальпії, масовий потік повітря можна подати у вигляді рівності: [8]

$$\frac{G \cdot v^2}{2} = G(c_p \cdot T_1 - c_p \cdot T_2), \quad (2.2)$$

де c_p – ізобарна теплоємність повітря, Дж/кмоль×К;

G – масовий потік повітряного потоку, кг/м²×с;

T_1, T_2 – температура при першому та другому стані повітряного середовища, тобто, до отвору і після нього, К.

Визначити провідність отвору U_{o1} , на основі рівняння (1.4) з врахуванням залежностей (2.1) та (2.2), можна за допомогою отриманого рівняння, Па·м³/с:

$$U_{o1} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]} \cdot \frac{A}{1 - (p_2 / p_1)} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (2.3)$$

де Q – потік повітря, Па×м³/с;

p_1, p_2 – тиск повітря до та після отвору, Па;

n – показник адиабати (для повітря $n=1,4$) [8-9];

R – універсальна газова стала, $R=8,31$ кДж/(кмоль·К) [8-9];

M – молекулярна маса повітря, кг/кмоль;

T – температура повітря, К.

Відношення (p_2/p_1) може бути наперед невідомо тому розрахунок ведуть шляхом послідовних наближень. При проектному методу розрахунків із великим запасом можна прийняти, у першому наближенні, що $U_{o1}=200 \times A$. [8]

Розглянемо другий випадок проходження повітря через впускний отвір між нескінченно великим і обмеженими об'ємами (рис. 2.1, б). Вхідний елемент у такому разі повинен з погляду другого закону термодинаміки мати однакову провідність при рухові повітря в обох напрямках.

Такий процес матиме вигляд: [8-9, 15]:

$$\frac{1}{U_{A1}} + \frac{1}{U_{mp}} + \frac{1}{U_{A1,A2}} = \frac{1}{U_{A2}} + \frac{1}{U_{mp}}, \quad (2.4)$$

де U_{A1} , U_{A2} – провідність отворів із площами отворів A_1 та A_2 з боку нескінченного об'єму, м³/с;

$U_{A1,A2}$ – провідність отвору із площею A_2 з боку трубопровода, м³/с;

U_{mp} – провідність трубопроводної частини отвору з меншою площею, м³/с.

Провідність комбінованого отвору, шляхом перетворення рівняння (2.4) можна записати у вигляді:

$$U_{A2A1} = \frac{U_{A2}}{1 - A_2 / A_1}, \quad (2.5)$$

Вищевикладена методика визначення провідності впускних отворів вакуумних насосів враховує тільки використання циліндричних отворів. Проте дослідженнями [17, 19-20] встановлено вплив форми приєднання елементів

вакуумної системи до вакуумного насоса на їх провідність. Тому, доцільно дослідити вплив форми отворів впускного та випускного тракту насоса на їх провідність.

2.2. Встановлення провідності різних форм впускного отвору вакуумного насоса

Характер газодинамічних процесів, що відбуваються при всмоктуванні залежить не тільки від площі перерізу впускного отвору, а й від форми отвору. Для цього обмежимося розглядом впускного елемента вакуумного насоса з круглим поперечним перерізом радіусом та товщиною стінки.

При стаціонарному потоці повітря v (м/с), утвореного на радіусі r приріст по площині перерізу dr (рис. 2.2) існує рівновага рушійної сили званої різницею тисків $F_{д.1}$, а також сили внутрішнього тертя $F_{тр.2}$.

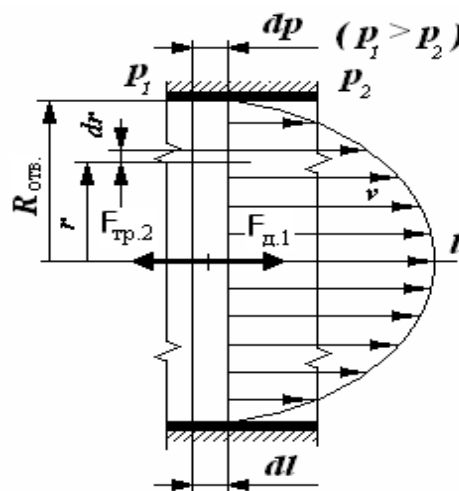


Рис. 2.2. Схема потоку повітря у циліндричній частині впускного отвору вакуумного насоса

На підставі умови рівноваги [17] запишемо:

$$\pi \cdot r^2 \cdot dp + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot dl = 0, \quad (2.6)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Н} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Відповідно до (2.6) можна вивести залежність для визначення провідності даного елемента в наступному вигляді:

$$U_o = \frac{Q}{(P_2 - P_1)} = \frac{\pi \cdot R_o^4 (P_1 + P_2)}{16 \cdot \eta \cdot l}, \quad (2.7)$$

де R – радіус поперечного перерізу, м;

l – довжина циліндричної частини отвору, м.

Конструкційно, впускний елемент вакуумного насоса можна вважати коротким трубопроводом, довжиною:

$$l \leq 0,029 \cdot d \cdot \text{Re}, \quad (2.8)$$

де Re – число Рейнольдса.

Провідність складного елемента, тобто такого що включає отвір (2.3) та трубопровід (2.7), слід визначати з виразу:

$$\frac{1}{U_{\text{отв}}} = \frac{1}{U_{01}} + \frac{1}{U_o}, \quad (2.9)$$

Для провідного отвору елементів прямокутного перерізу зі сторонами які співвідносяться як $a \geq b$, провідність можна встановити за формулою:

$$U_{\text{отв.пр.}} = 865 \cdot \xi \cdot \frac{a \cdot b^3}{l} \cdot \frac{(P_1 + P_2)}{2}, \quad (2.10)$$

де a та b – сторони прямокутного перерізу отвору, м;

l – довжина циліндра отвору, м;

ξ – коефіцієнт, який залежить від співвідношення сторін прямокутника, визначається з таблиці 2.1.

Для отвору у формі рівностороннього трикутника, провідність визначається за формулою:

$$U_{\text{отв.трик.}} = 299 \frac{a^4}{l} \cdot \frac{(P_1 + P_2)}{2}, \quad (2.11)$$

де a – сторона трикутного перерізу отвору, м.

Для отвору у формі еліпса, провідність визначається за формулою:

$$U_{\text{отв.ел.}} = \frac{\pi}{64} \cdot \frac{a^3 \cdot b^3}{\eta \cdot l \cdot (a^2 + b^2)} \cdot \frac{(P_1 + P_2)}{2}, \quad (2.12)$$

де a та b – відповідно велика та мала вісь еліптичного перерізу отвору, м.

Таблиця 2.1.

Величина коефіцієнта співвідношення сторін прямокутного отвору [17]

a/b	1	2	5	10	100	∞
ξ	2,3	3,7	4,7	5,0	5,3	5,3

У ході подальших теоретичних досліджень було отримано вираз для визначення коефіцієнта подачі вакуумного насоса в залежності від провідності його впускного елемента:

$$\eta_v = 1 - K_q \cdot \left(\frac{P_n \cdot (S_n + U_{\text{отв}})}{U_{\text{отв}} \cdot P_1} \right), \quad (2.13)$$

де P_1 – робочий тиск для доїльного апарата, Па;

P_n – тиск у нагнітальній порожнині насоса, Па;

K_q – коефіцієнт продуктивності, який залежить від ефективності наповнення насоса, $K_q=0,05-0,1$ [8-9].

Для порівняльної оцінки провідності отворів (U) різних форм, на основі рівнянь (2.7, 2.10-2.12), побудуємо графічні залежності (рис. 2.3). При цьому, виконаємо співставлення геометричних параметрів отвору до характерного розміру. За характерний розмір (d_e) прийнято діаметр круглого отвору. Так, за умови діаметра круга 50 мм: сторони прямокутника становили 50 мм; сторони рівностороннього трикутника – 50 мм; велика вісь еліпса – 50 мм, а мала вісь еліпса зменшена у 1,1 рази. Дослідження проводили при однаковому значенні рівня вакуумметричного тиску до та після отвору.

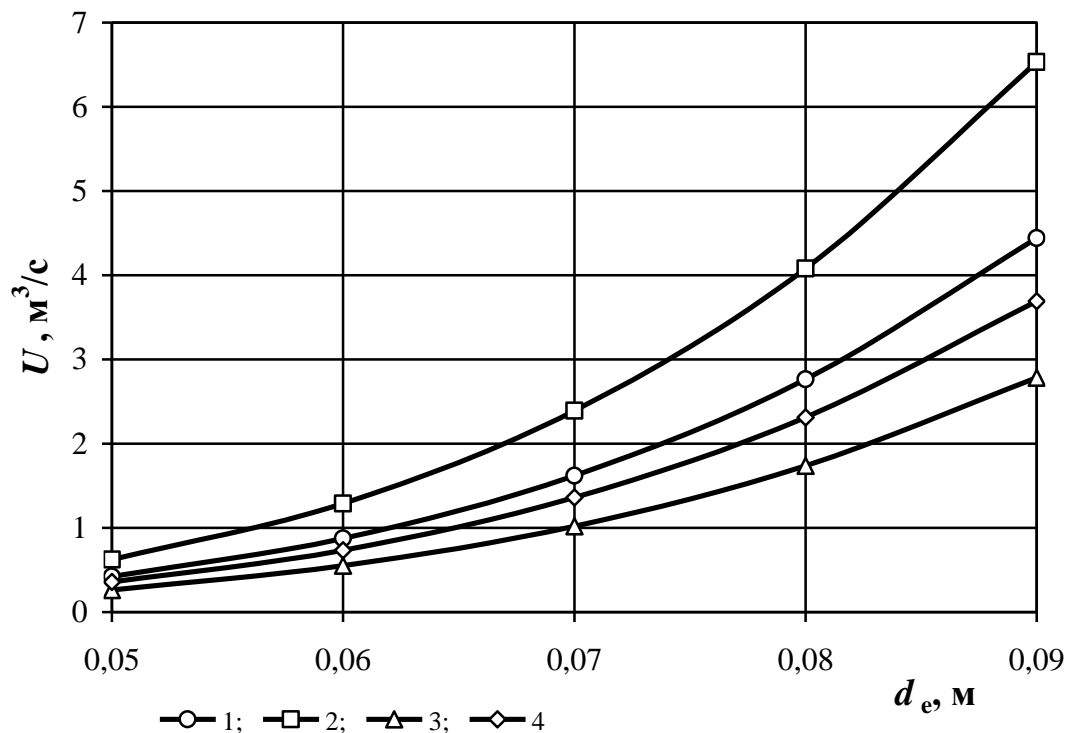


Рис. 2.3. Залежність провідності (U) від характерного розміру (d_e) та форми отвору: 1 – круглий; 2 – прямокутний; 3 – рівносторонній трикутник; 4 – еліпс.

Відповідно до графічних залежностей (рис. 2.3), провідність (U) впускного отвору вакуумного насоса зростає зі збільшенням його характерного

розміру (d_e). Для прямокутного отвору зі співвідношенням сторін $a/b=1$ провідність має найвище значення та зростає від $0,622 \text{ м}^3/\text{с}$ при $a=0,05 \text{ м}$ до $6,5331 \text{ м}^3/\text{с}$ при $a=0,09 \text{ м}$. Провідність круглого отвору дещо нижча порівняно із провідністю прямокутного отвору. Так, при $d=0,05 \text{ м}$ провідність відрізняється на 32 % (на $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ менша), а при $d=0,09 \text{ м}$ провідність знижується на $2,09 \text{ м}^3/\text{с}$, а у відсотковому співвідношенні – на 32 %. Можна зробити висновок, що незалежно від величини характерного розміру отвору, провідність прямокутного отвору із однаковими сторонами на 32 % вища порівняно із круглим отвором за однакових перепадів тиску перед та після отвору. Це можна пояснити збільшенням на 1,87 % площі прямокутного перерізу порівняно із круглим при однаковому характерному розмірі.

Провідність трикутного отвору з однаковими сторонами, що відповідають характерному розміру спільному для всіх форм отворів, виявилась найменшою серед досліджуваних форм отворів. Так, при $d=0,05 \text{ м}$ провідність складає лише 57,7 % від провідності прямокутного отвору, а при $d=0,09 \text{ м}$ провідність складає більше 83 % від провідності прямокутного отвору. Найменше значення провідності трикутного отвору можна пояснити найменшим значенням площі поперечного перерізу за умови однакового характерного розміру. Так, при $a=0,05 \text{ м}$ площа трикутника менша: на 44,8 % від площі круга, на 45,8 % від площі прямокутника, на 40,04 % від площі еліпса.

Незважаючи на суттєво меншу площу отвору трикутника, його провідність не суттєво відрізняється від провідності еліпса. Так, при $d=0,05 \text{ м}$ провідність складає 73,5 % від провідності отвору еліпса, а при $d=0,09 \text{ м}$ провідність складає 75,5 % від провідності отвору еліпса.

Провідність отвору у формі еліпса наближена на 85 % до провідності круглого отвору. Проте залишається нижчою на 43 % від провідності прямокутного отвору з аналогічним характерним розміром.

Продуктивність вакуумного насоса в залежності від провідності його впускного елемента визначається за залежністю:

$$Q_m = \frac{P_{вс} \cdot U_{омв} \cdot (P_1 \cdot Q_2 - K_q \cdot P_n \cdot Q_2)}{U_{омв} \cdot P_1 \cdot P_{вс} + K_q \cdot P_n \cdot Q_2}, \quad (2.14)$$

де $P_{вс}$ – тиск у всмоктувальній порожнині насоса, Па;

Потрібну потужність на валу ротора з врахуванням теоретичної продуктивності насоса (2.14), можна визначити з виразу: [10, 12, 15]

$$N_T = \frac{m}{m-1} \cdot P_{вс} \cdot Q_m \left[\left(\frac{P_n}{P_{вс}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (2.15)$$

де m – показник політропи, для повітря приймається рівним 1,4 [10].

Відповідно до залежності (2.15), потужність, яка витрачається на привод вала ротора вакуумного насоса визначається його продуктивністю та робочим вакуумметричним тиском у доїльній установці.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Виконані дослідження впливу типу впускного отвору корпусу вакуумного насоса на рівень провідності. Отримано аналітичну залежність визначення провідності отвору з врахуванням товщини стінки отвору у корпусі вакуумного насоса.

2. Встановлено аналітичні залежності для визначення провідності впускного отвору корпусу вакуумного насоса у формі круга, прямокутника, рівностороннього трикутника та еліпса. Доведено, що прямокутна форма отвору характеризується найвищою провідністю. Так, прямокутний отвір зі співвідношенням сторін $a/b=1$ має на 32 % вищу провідність порівняно із круглим отвором аналогічного характерного розміру.

РОЗДІЛ 3

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ВСМОКТУВАЛЬНО-НАГНІТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА РЕЖИМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО НАСОСА

3.1. Дослідження всмоктувально-нагнітальної системи ротаційного вакуумного насоса

Для забезпечення найкращих умов вакуумного режиму доїльної установки необхідно підібрати оптимальні технологічні параметри процесу.

Оптимальні технологічні параметри процесу відкачування повітря – це параметри, які забезпечують стабільність розрідження у вакуумній системі; дотримання фізіологічних вимог до вакуумного режиму; підвищення продуктивності системи; покращення зовнішньої характеристики насоса і дозволяють при цьому знизити питому енергоємність або металомісткість обладнання.

З метою визначення впливу техніко-технологічних і конструктивних параметрів насоса на продуктивність вакуумної системи проводили дослідження з використанням лабораторної установки (рис. 3.1).

Досліди проводилися на уніфікованій вакуумній установці УВУ 45/60 (рис. 3.1) в комплект якої входить: вакуумний насос з продуктивністю 60 м³/год; електродвигун з потужністю 4 кВт; рама; глушник; запобіжник. На ділянці між вакуумним насосом і вакуумним балоном була встановлена досліджувана камера в якій вставлено пластини з отворами. На пластині виконані отвори різного перерізу, форми.

Було досліджено отвори круглого, прямокутного, трикутного та овального перерізів. За показаннями приладів визначається величина розрідження до отвору та після нього, а також витрата повітря.

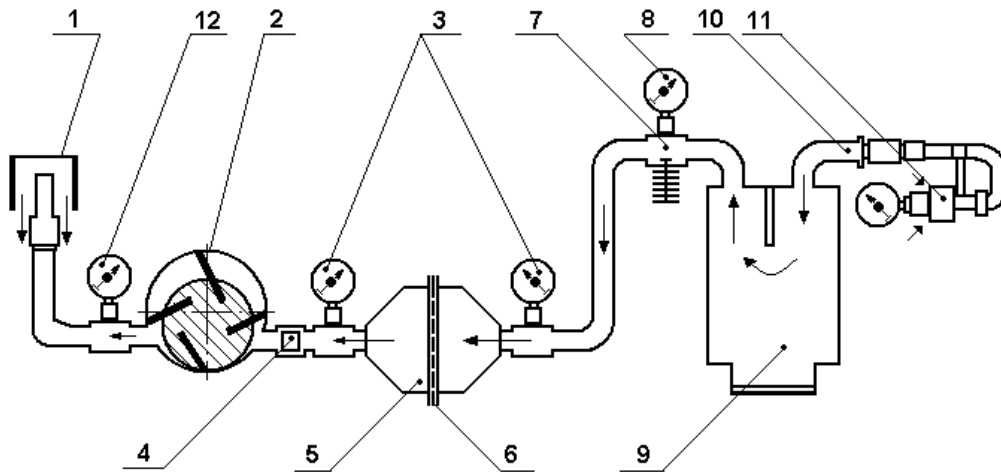


Рис. 3.1. Схема установки для дослідження провідності отворів різної геометричної форми: 1 – глушник; 2 – вакуумний насос УВД; 3 – вакуумметр; 4 – ковпачок запобіжника; 5 – камера; 6 – пластина з отворами різної форми; 7 – вакуумний регулятор; 8 – вакуумметр; 9 – вакуумний балон; 10 – вакуум-провід; 11 – індикатор КІ-4840М; 12 – манометр.

Використовуючи методи математичного моделювання на підставі отриманих досвідчених даних визначаються такі вихідні параметри як провідність отвору, продуктивність насоса та потрібна на його привід потужність. Отримані експериментальні дані оброблялися за допомогою пакета програм MS Office.

3.2. Встановлення ефективності ротаційного вакуумного насоса за різних форм впускного отвору

Для оцінки ефективної продуктивності вакуумної установки для доїльної установки проведемо дослідження продуктивності вакуумного насоса. В процесі досліджень змінювалися форми отворів, які мали однакову площу поперечного перерізу. В результаті досліджень отримали масив даних на основі яких побудували графічні залежності впливу площі перерізу отвору різної форми на продуктивність вакуумного насоса (рис. 3.2).

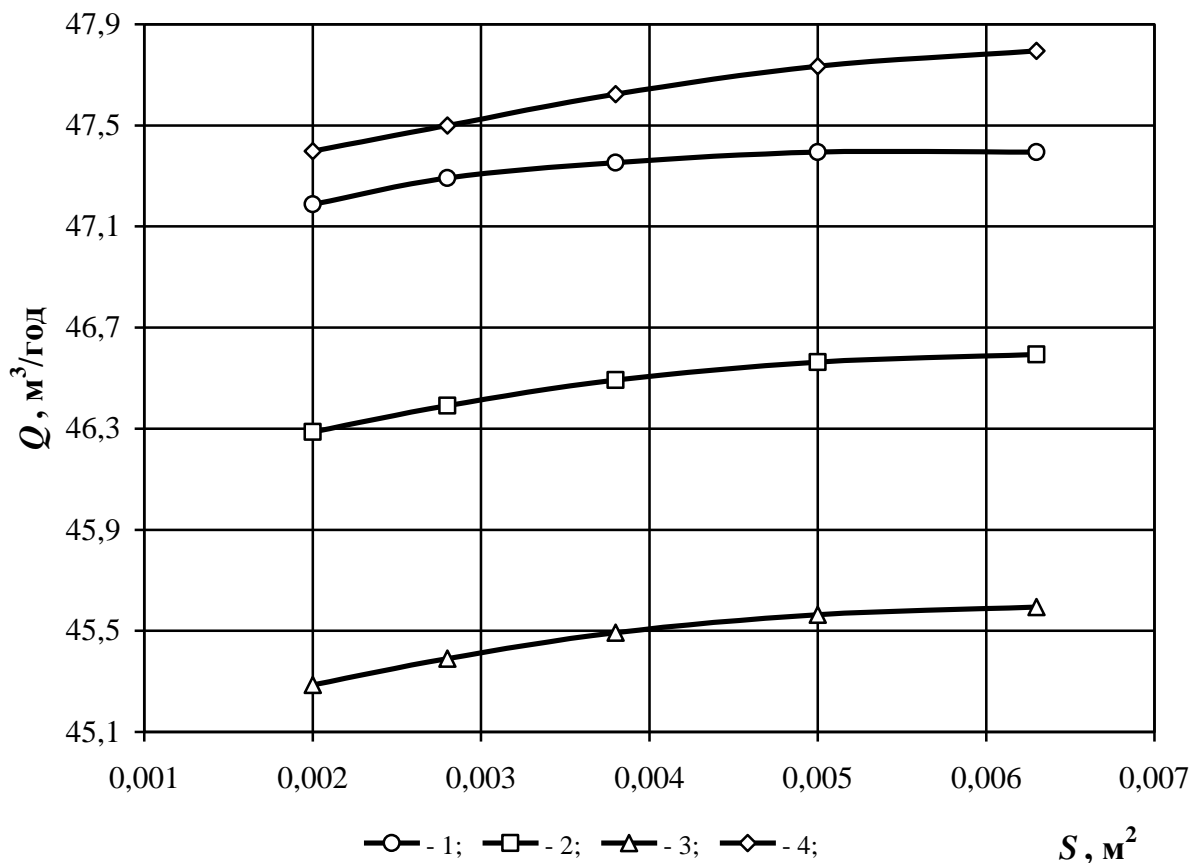


Рис. 3.2. Вплив площі (S) поперечного перерізу вхідного отвору на продуктивність вакуумного насоса (Q) залежно від форми отвору: 1 – круглий; 2 – прямокутний; 3 – трикутний; 4 – еліпсоїдний.

Відповідно до отриманих графічних залежностей (рис. 3.2), можна зробити висновок про незначне збільшення продуктивності вакуумного насоса зі збільшенням площі поперечного перерізу вхідного отвору на всмоктувальній магістралі вакуумного насоса. Найбільший приріст продуктивності спостерігається при використанні отвору у формі рівностороннього трикутника. Так зі збільшення площі перерізу трикутного отвору від $0,002 \text{ м}^2$ до $0,0063 \text{ м}^2$ продуктивність вакуумного насоса зростає на 1,8 %.

Найвища продуктивність вакуумного насоса спостерігається при використанні еліптичного отвору. Порівняно із трикутним отвором продуктивність вакуумного насоса зростає на $2,02 \text{ м}^3/\text{год}$, або на 4,5 %. Прямокутний отвір займає проміжне положення. Значення продуктивності

вакуумного насоса із отвором у формі еліпса вище ніж круглого отвору на $1,4 \text{ м}^3/\text{год}$, що може вказувати на резерви підвищення ефективності вакуумного насоса. Але приріст продуктивності круглого та еліпсовидного отворів при збільшенні площі поперечного перерізу від $0,002 \text{ м}^2$ до $0,0063 \text{ м}^2$ становить лише $1,6 \%$.

Несуттєва зміна продуктивності пояснюється значно більшим впливом рівня робочого вакуумметричного тиску у вакуумній магістралі доїльної установки (рис. 3.3).

За результатами досліджень отримали рівняння регресії яке описує вплив на продуктивність вакуумного насоса форми та площі впускного отвору:

- для еліпсовидного отвору:

$$Q = -488,12 \cdot S^2 + 5,286 \cdot S + 47,78, \quad (3.1)$$

де S – площа поперечного перерізу отвору, м^2 .

- для круглого отвору:

$$Q = -490,63 \cdot S^2 + 5,312 \cdot S + 47,38, \quad (3.2)$$

- для прямокутного отвору:

$$Q = -559,6 \cdot S^2 + 6,081 \cdot S + 46,58, \quad (3.3)$$

- для трикутного отвору:

$$Q = -647,6 \cdot S^2 + 7,303 \cdot S + 45,56 \quad (3.4)$$

Достовірність підтверджується високим значенням коефіцієнта кореляції $R^2=0,97$ для рівнянь (3.1-3.4).

За умови використання отворів різних форм за критерієм характерного розміру спостерігаються біль суттєві відмінності у результатах дослідження провідності всмоктувального отвору вакуумного насоса (рис. 2.3).

Найкращі значення у збільшенні продуктивності вакуумного насоса за умови використання однакової площі поперечного перерізу для отворів різних форм, належать отворам у формі еліпса. Відбувається приріст продуктивності

за рахунок вищого на $212 \text{ м}^3/\text{год}$ значення провідності, що вказує на менші втрати тиску при подолання отворів даної форми.

Таким чином, впускний отвір у формі еліпса забезпечує вищу продуктивність вакуумного насоса при аналогічній площі поперечного перерізу прямокутного та круглого отворів. Розглянемо вплив вакуумметричного тиску та площі отвору на продуктивність вакуумного насоса (рис. 3.3).

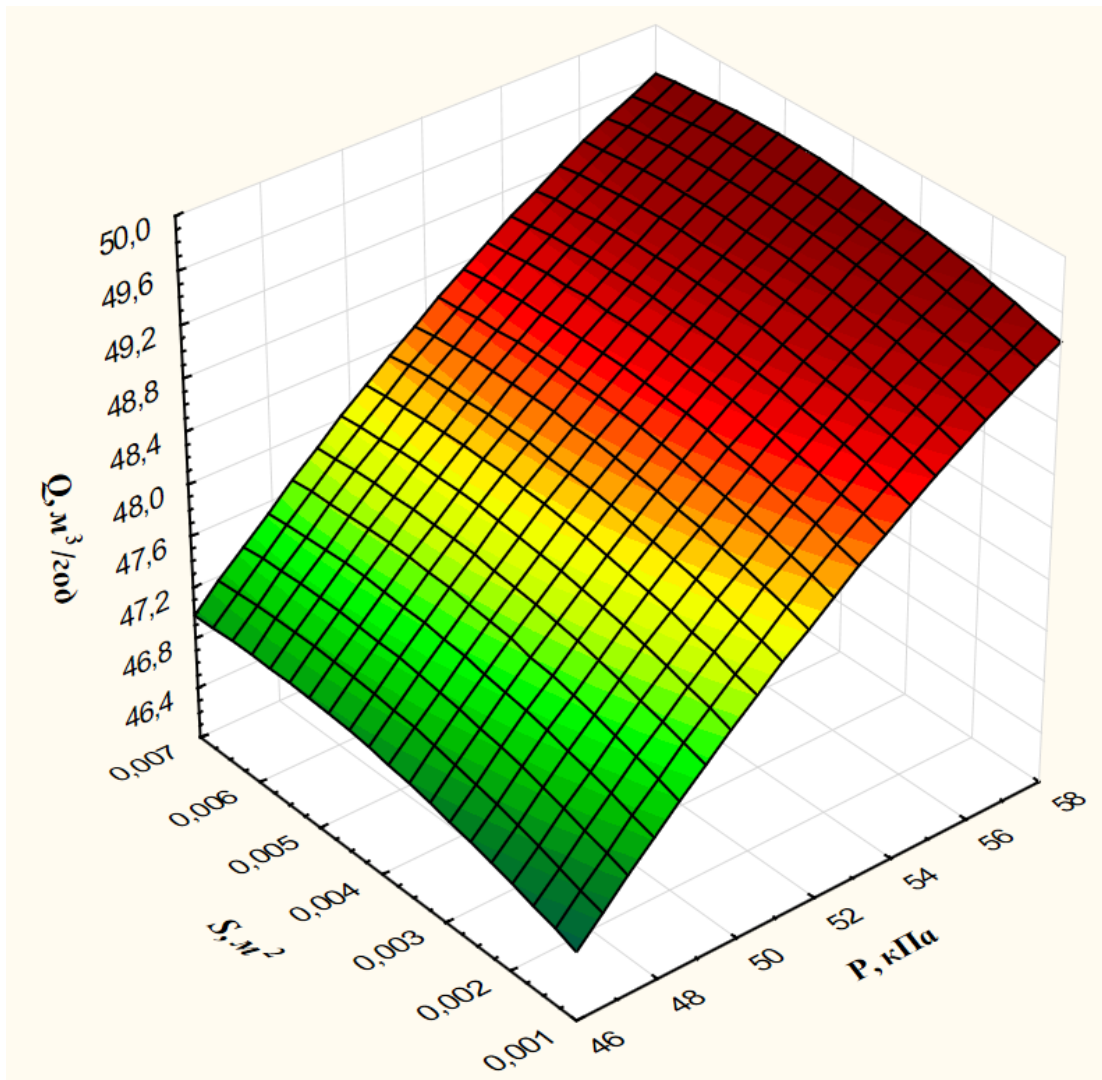


Рис. 3.3. Залежність продуктивності вакуумного насоса (Q) від площі поперечного перерізу впускного отвору (S) у формі еліпса та рівня вакуумметричного тиску (P) у вакуумній мережі доїльної установки

Відповідно до отриманої поверхні відгуку (рис. 3.3), продуктивність вакуумного насоса зростає зі збільшенням рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки при всіх значеннях площі поперечного перерізу впускного отвору. Це пояснюється необхідністю видалення із вакуумної мережі більшої кількості повітря для досягнення необхідного вакуумметричного тиску.

За результатами досліджень отримали рівняння регресії яке пов'язує продуктивність вакуумного насоса із площею впускного отвору та рівнем вакуумметричного тиску:

$$Q = 17,906 + 0,917 \cdot P + 348,315 \cdot S - 0,0065 \cdot P^2 - 2,601 \cdot P \cdot S - 19426,36 \cdot S^2 \quad (3.5)$$

де S – площа поперечного перерізу отвору, м²;

P – рівень вакуумметричного тиску у вакуум-проводі, кПа.

В наслідок підвищення продуктивності з одночасним збільшенням провідності елементів вакуумної мережі досягається зниження витрат потужності на привод вакуумного насоса з 3,75 до 3,6 кВт, що призводить до отримання додаткової економічної вигоди 1927,2 грн/рік для молочної ферми на 600 корів.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Дослідження впливу площі поперечного перерізу впускного отвору різної форми вказали на переваги використання отвору у формі еліпсу.

2. Використання впускного отвору вакуумного насоса у формі еліпса дозволить знизити витрати електроенергії на привод насоса, що дозволить отримати додаткову економію коштів у сумі 1927,2 грн/рік.

ВИСНОВКИ

1. Найбільшого поширення для доїльних установок вітчизняних та закордонних виробників набули ротаційні вакуумні насоси пластинчастого типу. Вакуумні насоси даного типу відрізняються простотою конструкції та технічного обслуговування, швидкохідністю, гарною врівноваженістю та плавністю роботи. Встановлено, що на рівень вакуумного тиску та швидкодію впливають його конструкційні та геометричні параметри, які визначають втрати тиску у кожному елементі. При цьому важливе значення має форма та геометричні розміри конструкційних елементів через які проходить потік повітря до робочої порожнини вакуумного насоса.

2. Виконані дослідження впливу форми впускного отвору корпусу вакуумного насоса на рівень провідності. Отримано аналітичну залежність визначення провідності отвору з врахуванням товщини стінки отвору у корпусі вакуумного насоса.

3. Встановлено аналітичні залежності для визначення провідності впускного отвору корпусу вакуумного насоса у формі круга, прямокутника, рівностороннього трикутника та еліпса. Теоретичними дослідженнями встановлено, що прямокутний отвір має найвищу провідність за умови співставлення до характерного розміру усіх форм отворів. Так, прямокутний отвір зі співвідношенням сторін рівним одиниці (квадрат зі сторонами 0,09 м) має на 32 % вищу провідність порівняно із круглим отвором аналогічного характерного розміру.

4. За умови використання однакової площі поперечного перерізу отворів досліджуваних форм, теоретично встановлено, що найбільшу провідність має отвір у формі еліпса. Так, провідність отвору у формі еліпса на 21 % вища ніж прямокутного отвору, на 17,2 % вища ніж рівностороннього трикутного отвору та на 7,4 % вища ніж круглого отвору. Вище значення провідності трикутного отвору порівняно із прямокутним можна пояснити збільшеним на 13 % периметром. Проте периметр еліпсоподібного та круглого отворів відрізняються

лише на 0,13 %, а за умови однаковості характерних розмірів, периметр еліпса на 4,0 % менший ніж круглого отвору.

5. Встановлено, що продуктивність вакуумного насоса буде найвищою при використанні еліпсовидного отвору однакової площі. Порівняно із прямокутним отвором продуктивність вакуумного насоса зростає на 2,02 м³/год, або на 4,5 %. Значення продуктивності вакуумного насоса із отвором у формі еліпса вище ніж круглого отвору на 1,4 м³/год, що може вказувати на резерви підвищення ефективності вакуумного насоса. Відбувається приріст продуктивності за рахунок вищої на 212 м³/год провідності еліпсовидного отвору порівняно із круглим, що вказує на менші втрати тиску. За результатами досліджень отримали рівняння регресії яке описує вплив на продуктивність вакуумного насоса отворів різної форми при однаковій площі поперечного перерізу впускного отвору.

6. Дослідженнями встановлено, що продуктивність вакуумного насоса зростає зі збільшенням рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки при всіх значеннях площі поперечного перерізу впускного отвору. Це пояснюється необхідністю видалення із вакуумної мережі більшої кількості повітря для досягнення необхідного вакуумметричного тиску. За результатами досліджень отримали рівняння регресії яке пов'язує продуктивність вакуумного насоса із площею впускного отвору та рівнем вакуумметричного тиску

7. Встановлено, що за рахунок підвищення продуктивності вакуумного насоса із еліпсовидним отвором порівняно із прямокутним досягається зниження витрат потужності на привод вакуумного насоса з 3,75 до 3,6 кВт, що призводить до отримання додаткової економічної вигоди у 1927,2 грн/рік для молочної ферми на 600 корів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика: монографія. К., 2008. 198 с.
2. Посібник-практикум: машини та обладнання для тваринництва / І. І. Ревенко та ін. К.:Кондор, 2011. 396 с.
3. Машини та обладнання для тваринництва / за ред. І. Г. Бойко; том 2. Х., 2006. 279 с
4. Машини для тваринництва та птахівництва. / за ред. В. І. Кравчука та Ю. Ф. Мельника. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. 207 с.
5. Медведський О. В., Коновалов О. В. Резерви підвищення ефективності пластинчасто-роторного вакуумного насоса. *Зб. доп. 3-ї наук.-техн. конф. наук.-пед. працівників інж.-техн. ф-ту ЖНАЕУ*, 13 берез. 2014 р. Житомир : ЖНАЕУ, 2014. С. 40–44.
6. Ревенко І. І., Ревенко Ю. І. Удосконалення вакуумної установки доїльних агрегатів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК*. 2015. Вип. 212(1). С. 108–113.
7. Бех І. І. Основи фізики вакууму та вакуумної техніки. Методи отримання високого й надвисокого вакууму: навч. посіб. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2001. 105 с.
8. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки: навч. посіб. Суми: ВТД «Університетська книга», 2011. Ч. 1. 253 с.
9. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки: навч. посіб. Суми: ВТД «Університетська книга», 2012. Ч. 2. 295 с.
10. Митропольський І. Є., Грицак Р. В. Вакуумна техніка: навч. посіб. Ужгород. Видавництво УжНУ «Говерла», 2018. 138 с.
11. Сич А. М. Встановлення параметричних характеристик вакуумних насосів. *Студентські читання–2023* : матеріали науково-практичної

конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 36–38.

12. Шеремет Р. М. Техніка створення вакууму: навч. посіб. Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 188 с.

13. Шепілко Е. В Вакуумна техніка: конспект лекцій. Харків: ХНАМГ, 2005. 122 с.

14. Медведський О. В., Сич А. М. Оцінка конструкційно-технологічних параметрів конструкційних елементів ротаційного вакуумного насоса. *Біоенергетичні системи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 36–38.

15. Бібик В. В., Бурик І. П., Гричановська Т. М. Вакуумна техніка: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2015. 177 с.

16. Шимон Л.Л. Техніка фізичного експерименту: навч. посіб. Частина 1. Фізичні основи вакуумної техніки. Ужгород: Вид. УжНУ «Говерла», 2008. 400 с.

17. Бойко А. В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х. : НТУ «ХП», 2007. 444 с.

18. Медведський О. В., Сич А. М. Вплив геометрії впускної та випускної системи вакуумного насоса на рівень провідності. *Інженерні процеси та системи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 44–47.

19. Медведський О. В. Динаміка зміни тиску в об'ємах конструктивних елементів вакуумної системи мобільної доїльної установки. *Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2015. Вип. 212, ч. 2. С. 161-167.

20. Ревенко І. І., Медведський О. В. Вплив конструктивних параметрів та компоновочних схем на стабільність режимних характеристик індивідуальних доїльних установок. *Наук. вісн. НАУ*. 2006. Вип. 95. С. 261–265.