

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

УДК 637.116

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

ДЯЧУК Олександр Вікторович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ
МАЛОГАБАРИТНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

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

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Дячук О. В. **Підвищення ефективності вакуумної системи малогабаритної доїльної установки.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У кваліфікаційній роботі подана оцінка конструктивних схем вакуумних систем малогабаритних доїльних установок, встановлено вплив конструкційних параметрів серійного обладнання на технологічні показники роботи.

Кваліфікаційна робота вирішує наукове завдання підвищення ефективності вакуумної системи малогабаритної доїльної установки шляхом обґрунтування геометричних параметрів та конструкційного компонування вакуумної мережі та вакуумного балона.

Отримані аналітичні залежності впливу конструктивних параметрів складових вакуумної мережі та її функціональних схем на флуктуацію вакуумметричного тиску. Обґрунтовано експлуатаційну ефективність впровадження запропонованих удосконалень вакуумної системи, наведені практичні рекомендації.

Ключові слова: доїльна установка, вакуумна система, вакуумметричний тиск, стабільність тиску, функціональне компонування.

ANNOTATION

Dyachuk O. V. **Improving the efficiency of the vacuum system of the compact milking installation.** – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work of master degree in the specialty 208 – agroengineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In qualification work the estimation of constructive schemes of vacuum systems of small-sized milking installations is given, influence of design parameters of the serial equipment on technological indicators of work is established.

Qualification work solves the scientific problem of increasing the efficiency of the vacuum system of a small milking installation by substantiating the geometric parameters and structural layout of the vacuum network and the vacuum cylinder.

Analytical dependences of influence of constructive parameters of components of a vacuum network and its functional schemes on fluctuation of vacuum pressure are received. The operational efficiency of the implementation of the proposed improvements of the vacuum system is substantiated, practical recommendations are given.

Key words: milking installation, vacuum system, vacuum gauge pressure, pressure stability, functional combining.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА МАЛОГАБАРИТНИХ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК ..	6
1.1. Оцінка конструктивних схем вакуумної системи малогабаритних доїльних установок	6
1.2. Встановлення конструкційних параметрів та технологічних показників роботи малогабаритних доїльних установок	12
1.3. Висновки до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО КОМПОНУВАННЯ ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГАБАРИТНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	17
2.1. Теоретичні передумови удосконалення вакуумної системи малогабаритної доїльної установки	17
2.2. Дослідження зміни рівня тиску залежно від способів поєднання вакуумної лінії та вакуумного балона	19
2.3. Методика експериментального дослідження вакуумної системи малогабаритної доїльної установки	25
2.4. Висновки до розділу 2	26
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАЛОГАБАРИТНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	27
3.1. Встановлення ефективності удосконаленої конструкційно- технологічної схеми вакуумної системи	27
3.2. Висновки до розділу 3	30
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32
ДОДАТКИ	36

ВСТУП

Актуальність теми. Поширеним у селянських господарствах, які виробляють близько 70 % незбираного молока в країні, є ручне доїння корів. Недоліки ручного доїння – велика трудомісткість виконуваних операцій та низька якість отриманого молока. Бактеріальна забрудненість молока зумовлена його контактом з оточуючим середовищем. При використанні процесу доїння молока у закритому середовищі зростають показники його чистоти. Тому застосування технічних засобів машинного доїння корів у таких господарствах є першочерговою необхідністю. Промисловість, як вітчизняна так і закордонна, пропонує велику різноманітність малогабаритних пересувних або переносних доїльних установок саме для умов селянських господарств.

Незважаючи на конструкційну схожість та аналогічну обслуговуючу здатність, за конструктивними та технологічними параметрами серійні малогабаритні доїльні установки різних виробників відрізняється між собою. Це стосується, в першу чергу, відмінностей у конструкційному виконанні та геометричних параметрах вакуумної системи. За умови комплектування таких установок вакуумними насосами довільної продуктивності, може виникнути суттєві втрати тиску під час машинного доїння корів. Значні коливання вакуумметричного тиску у вакуумній мережі негативно впливатимуть на здоров'я корів та повноту видоювання молока при збереженні його жирності.

У зв'язку з відміченим виникає необхідність дослідити вплив геометрично-просторового компонування вакуумної системи малогабаритної доїльної установки на стабільність вакуумного режиму під час машинного доїння корів.

Мета і задачі досліджень. Мета досліджень – підвищення ефективності малогабаритної доїльної установки за рахунок зниження втрат тиску шляхом удосконалення вакуумної системи.

Для досягнення поставленої мети підлягають вирішенню такі завдання:

- виконати оцінку вакуумних систем серійних малогабаритних доїльних установок;

- встановити вплив конструкційних параметрів вакуумної системи на питомі експлуатаційні показники;
- проаналізувати взаємозв'язок між динамікою вакуумметричного тиску у вакуумній мережі та геометрично-просторовим компонуванням вакуумної системи;
- встановити раціональну структурно-функціональну схему сполучення компонентів вакуумної мережі та оцінити її ефективність.

Об'єкт дослідження – конструкція вакуумної системи малогабаритної доїльної установки.

Предмет дослідження – вплив конструктивних та геометричних характеристик складових вакуумної системи на рівень та втрати вакуумметричного тиску.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань використовували теоретичні дослідження із застосуванням теорії математичного моделювання та використанням основних положень гідродинаміки, теплотехніки і вакуумної техніки.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень кваліфікаційної роботи викладено у роботах:

1. Дячук О. В. Вплив елементів вакуумної системи доїльної установки на сукупні втрати тиску. *Біоенергетичні системи : Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції*. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. Ч. 2 С. 57–59.
2. Дячук О. В. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів вакуумної системи доїльної установки. *Матеріали науково-практичної конференції «Наукові читання–2020»*. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 132–134.
3. Дячук О. В. Порівняльна оцінка конструкційних особливостей вакуумної системи малогабаритних доїльних установок. *Матеріали науково-практичної конференції «Студентські читання–2020»*. Житомир: ПНУ, 2020. С. 386–387.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота включає вступ, три розділи основної частини, загальні висновки, список використаних літературних джерел та додатки, викладена на 36 сторінках комп'ютерного тексту.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА МАЛОГАБАРИТНИХ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

1.1 Оцінка конструктивних схем вакуумної системи малогабаритних доїльних установок

Малогабаритні доїльні установки використовують для доїння корів як у приміщенні де утримують корів, так і за його межами. Ця особливість надає перевагу такого типу обладнання порівняно із стаціонарними доїльними установками. Малогабаритні доїльні установки мають ідентичний набір складових, що змонтовані на візку: вакуумний насос, вакуум-провідна система, вакуумний балон, доїльний апарат та молокоприймальне відро.

Для оцінки конструкційних відмінностей розглянемо декілька одиниць серійного обладнання. Шведська фірма «DeLaval» [1, 2] представлена на ринку малогабаритними доїльними установками типу «Bosio» (рис. 1.1).

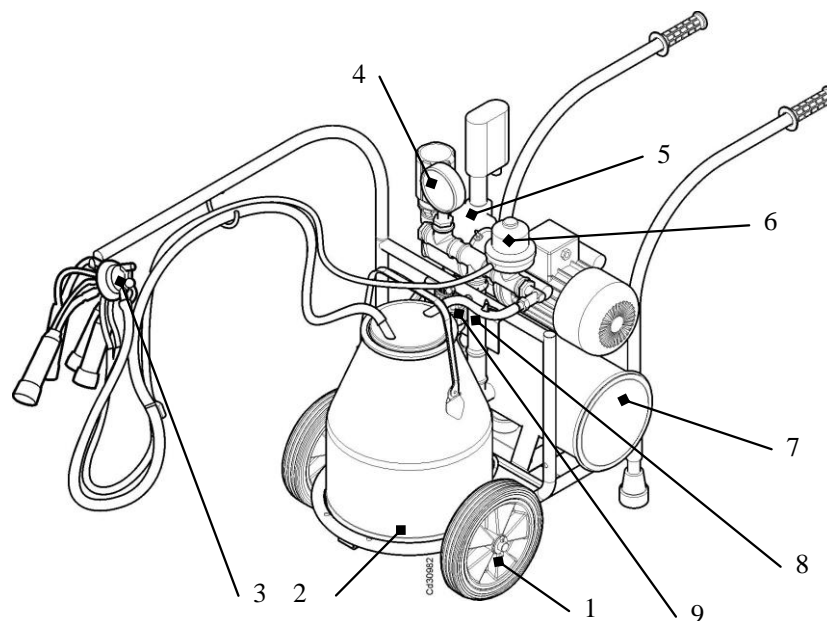


Рис. 1.1. Мобільна доїльна установка фірми «DeLaval» (Швеція):

1 – візок; 2 – молочне відро; 3 – підвісна частина доїльного апарата; 4 – вакуумметр; 5 – вакуумний насос; 6 – пульсатор; 7 – вакуумний балон; 8 – вакуум-провід; 9 – вакуумний регулятор

Особливістю доїльних установок типу «Vosio» полягає у можливості комплектування одним або двома доїльними апаратами зі збиранням молока в одне або два доїльних відра однакової місткості (25 літрів). Модель Vosio MMU11 пропонується для поголів'я стада на 12 корів (один доїльний апарат та одне молочне відро), а Vosio MMU22 – 24 корови (два доїльних апарати та два молочних відра). Виробник наголошує що дане обладнання просте в обслуговуванні та експлуатації, а наявність коліс збільшеного діаметру покращує маневреність та мобільні характеристики.

Малогабаритна доїльна установка MobiMelk фірми «Westfalia Surge» (рис. 1.2) обладнана двома доїльними апаратами, але молоко надходить до однієї молочної місткості об'ємом 40 літрів [3].



Рис. 1.2. Мобільна доїльна установка MobiMelk фірми «GEA Farm Technologies» (Німеччина): 1 – візок; 2 – молочне відро; 3 – підвісна частина доїльного апарата; 4 – вакуумний агрегат; 5 – вакуумний балон; 6 – вакуум-провід.

Одна молочна місткість збільшеного об'єму при використанні двох доїльних апаратів дозволяє отримати значно менші габарити установки

порівняно із комплектуванням двома доїльними відрами при одночасному доїнні двох корів, як у Bosio MMU22.

Вітчизняний виробник доїльного обладнання ДТВ «Брацлав» пропонує установки для індивідуального доїння УІД-10 – з одним доїльним апаратом зі збиранням молока в одне молочне відро та УІД-20 – з двома доїльними апаратами зі збиранням молока в два молочних відра (рис. 1.3) [4, 5].



Рис. 1.3. Малогабаритна пересувна доїльна установка УІД-10 (а) та УІД-20 (б): 1 – візок; 2 – молочне відро; 3 – підвісна частина доїльного апарата; 4 – вакуумний насос; 5 – вакуумний балон; 6 – вакуум-провід.

Відповідно до проведених досліджень [6] малогабаритні доїльні агрегати типу «Bosio» мають деяку перевагу порівняно із обладнанням типу УІД. Так, за обслуговуючою здатністю на 6,2 % вища у варіанті з одним доїльним апаратом та на 37,5 % вища при використанні двох доїльних апаратів. Щодо технологічних показників, то продуктивністю оператора машинного доїння також вища на 25 % у варіанті з двома доїльними апаратами. Незважаючи на це вітчизняне обладнання створює гідну конкуренцію як за якістю так і ефективністю використання у селянських та невеликих фермерських господарствах.

На ринку представлені малогабаритні доїльні установки, котрі не обладнанні вакуумним балоном. Наприклад, у доїльній установці ELMAS-1 (Туреччина) функцію вакуумного балона виконує вакуумна магістраль, яка виготовлена з трубопроводу великого діаметру (60 мм), а молочне відро має об'єм 30 л. (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Малогабаритна доїльна установка ELMAS-1: 1 – візок; 2 – молочне відро; 3 – підвісна частина доїльного апарата; 4 – вакуумний агрегат; 5 – вакуумна магістраль.

Відсутність вакуумного балона робить установку ELMAS-1 більш легкою та компактною, порівняно з іншими. Але дослідження [7] вказують на доцільність комплектувати малогабаритні установки вакуумним балоном раціонального об'єму. Вітчизняні доїльні агрегати «Березка-1» та «Березка-2» також позбавлені вакуумного балона. Функцію ресивера виконує вакуумна магістраль діаметром 80 мм. На перший погляд діаметри вакуумних магістралей для ELMAS-1 та установок «Березка» прийнято довільним чином.

Окрім вказаних відмінностей, малогабаритні доїльні установки різних фірм-виробників мають різні структурні схеми та параметри вакуумної системи. Вакуумна система поєднує складові, які забезпечують функціонування

малогабаритної доїльної установки із заданими режимами роботи. В першу чергу це забезпечення необхідного рівня та стабільності вакуумметричного тиску. В свою чергу, стабільність вакууму визначається мінімальними втратами тиску під час роботи доїльного апарата.

До складу вакуумної системи входить вакуумний насос, вакуум-провід (вакуумна магістраль), вакуумний балон (або вакуумна магістраль збільшеного об'єму), гнучкі повітропроводи та молочне відро (рис. 1.5).

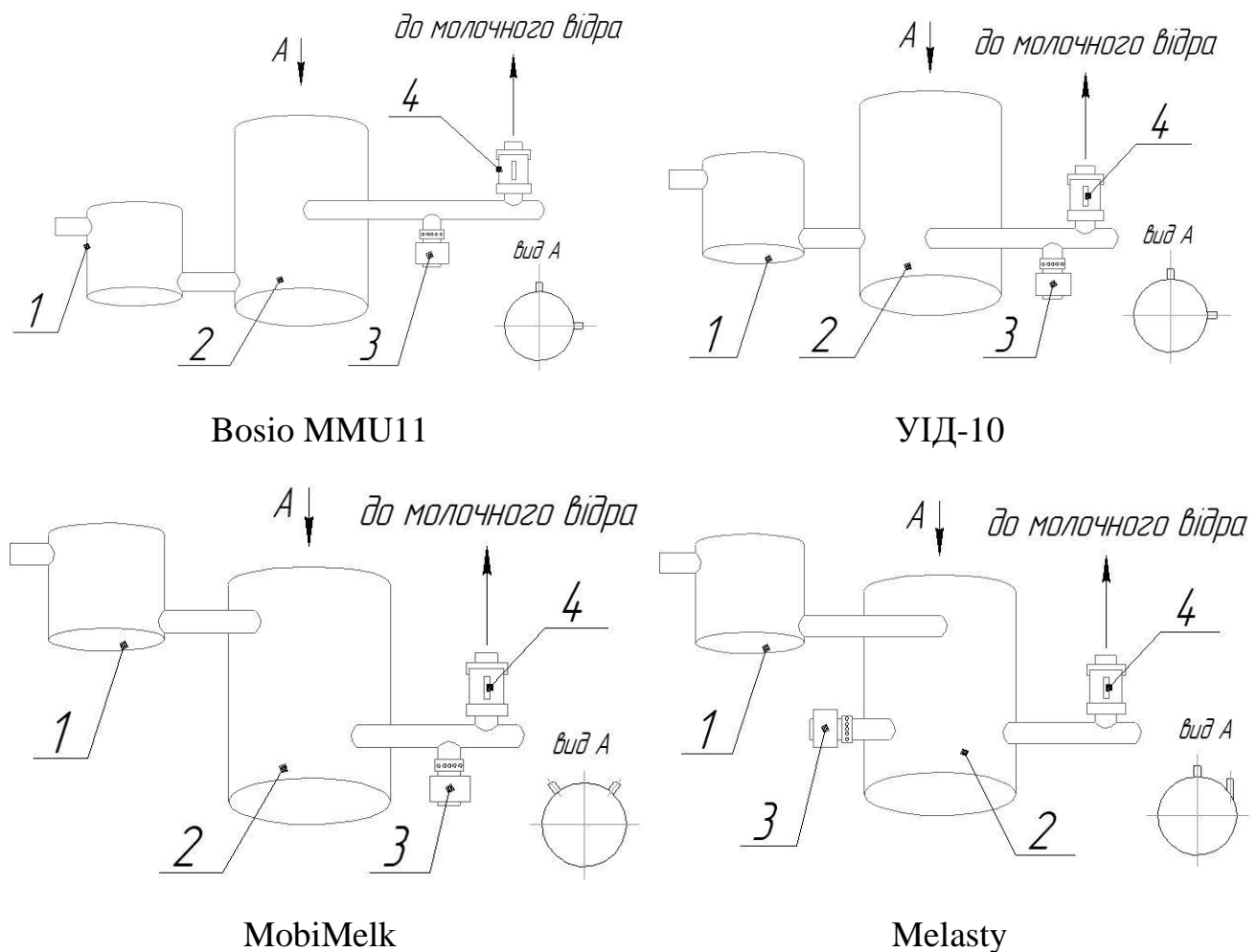


Рис. 1.5. Схеми вакуумних систем малогабаритних доїльних установок: 1 – вакуумний насос; 2 – вакуумний балон; 3 – вакуумний регулятор; 4 – вакуумний кран (власні дослідження).

Як видно із рис. 1.5, вакуумні системи мають деякі конструкційні відмінності. Окрім відмінності щодо параметрів (об'єм вакуумного балона,

об'єм молочного відра, за умови одного доїльного апарата), чітко прослідковуються відмінності способів та схем поєднання компонентів між собою та послідовність такого поєднання. У малогабаритних доїльних установок Bosio MMU11 та УІД-10 схожа схема під'єднання патрубків вакуумного насоса та вакуумної магістралі до вакуумного балона (по його осях). Така схема є логічною щодо раціональності компоновання вакуумного насоса та вакуумного балона. Малогабаритні пересувні доїльні установки MobiMelk та Melasty використовують дотичне та тангенціально-паралельне поєднання патрубків із вакуумним балоном.

Натомість, вітчизняні вчені [8] пропонують наступну схему поєднання патрубків вакуумного насоса та вакуумної магістралі до вакуумного балона (рис. 1.6).

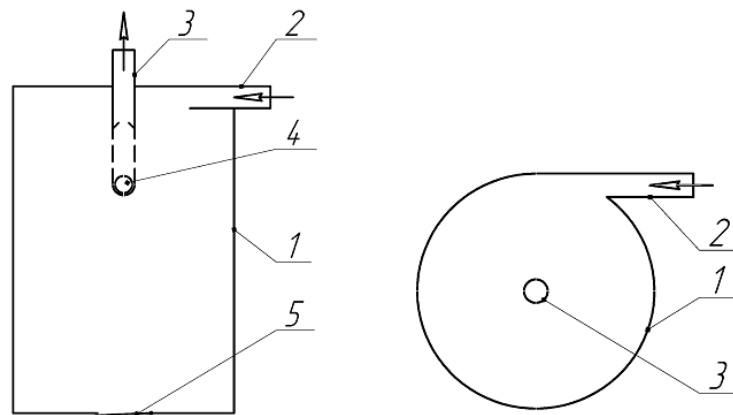


Рис. 1.6. Схема вакуумного балона із приєднаними патрубками та поперечний переріз: 1 – корпус; 2 – впускний патрубок; 3 – випускний патрубок; 4 – кульковий клапан; 5 – зливна кришка

Вчені [9] вказують на доцільність розміщення патрубка вакуумної магістралі збоку по дотичній до циліндра корпусу, а патрубка вакуумного насоса по осі циліндра вакуумного балона. Це має сприятиме відцентровому відділенню від повітря механічних домішок, а центральне осьове розміщення забезпечить всмоктування вакуумним насосом повітря із максимально очищеної зони. Результатом такого рішення має слугувати підвищений ресурс

роботи вакуумного насоса [8, 9]. Проте, жодного пояснення впливу такого рішення на якість технологічного процесу машинного доїння не наведено.

Розглянемо технологічні та експлуатаційні показники малогабаритних доїльних установок.

1.2. Встановлення конструкційних параметрів та технологічних показників роботи малогабаритних доїльних установок

Технологічними показниками малогабаритних доїльних установок визначено рівень вакуумметричного тиску та його стабільність [10, 11]. Величина вакуумметричного тиску пов'язана прямою залежністю зі швидкістю виведення молока з вимені корови [11, 12, 13, 14]. Так, зі зростанням вакууму збільшується швидкість доїння, але занадто високий його рівень створює передумови негативного впливу на здоров'я тварин [15]. Тому, необхідно мати оптимальне значення вакуумметричного тиску безпечного рівня 37,2–42,6 кПа [15]. Такі параметри забезпечують зниження в 3–4 рази захворювання на мастит, на 9,7 % менше травмуються дійки тварини та зростає продуктивність корів на 10,4 % порівняно із вакуумметричним тиском в 47,0–53,3 кПа [10, 13].

Для ефективного машинного доїння корів важливим є забезпечення постійності вакуумметричного тиску та мінімальні його втрати, що викликані конструкційними особливостями технологічних ліній малогабаритних доїльних установок [16, 17]. Дослідженнями [18] встановлено, що в існуючих вакуум-проводах, залежно від їх довжини та кількості одночасно працюючих доїльних апаратів, втрати тиску можуть сягати 1,1–5,16 кПа, а це може впливати на зміну частоти пульсації доїльного апарата. Так, короткотривала зміна частоти пульсації доїльних апаратів викликає зниження швидкості доїння корів на 11,8 % та зменшення продуктивності корів на 9,2 % [10], що порушує технологію машинного доїння корів.

Виконаємо оцінку конструктивних параметрів вакуумної системи малогабаритних доїльних установок, табл. 1.1.

Параметри вакуумної системи малогабаритних доїльних установок

Модель обладнання	Місткість для збирання молока, л	Об'єм вакуумного балона, л	Продуктивність вакуумного насоса, м ³ /год	Маса установки, кг
УІД-10	20 (1)	9	6	57
УІД-20	40 (2×20)	9	6	65
Bosio MMU11	25 (1)	20	10,2	67
Bosio MMU22	50 (2×25)	20	10,2	82
MobiMelk	40 (1)	20	12	60
ELMAS-1	30 (1)	3	10,8	48
Melasty TK 1-PS	30 (1)	18	12	53
Melasty TK 1-2PS	60 (2×30)	18	12	64

Аналіз табл. 1.1 вказує, що за параметрами продуктивності вакуумного насоса та об'ємом вакуумної системи малогабаритні доїльні установки різняться між собою (рис. 1.7 – 1.8).

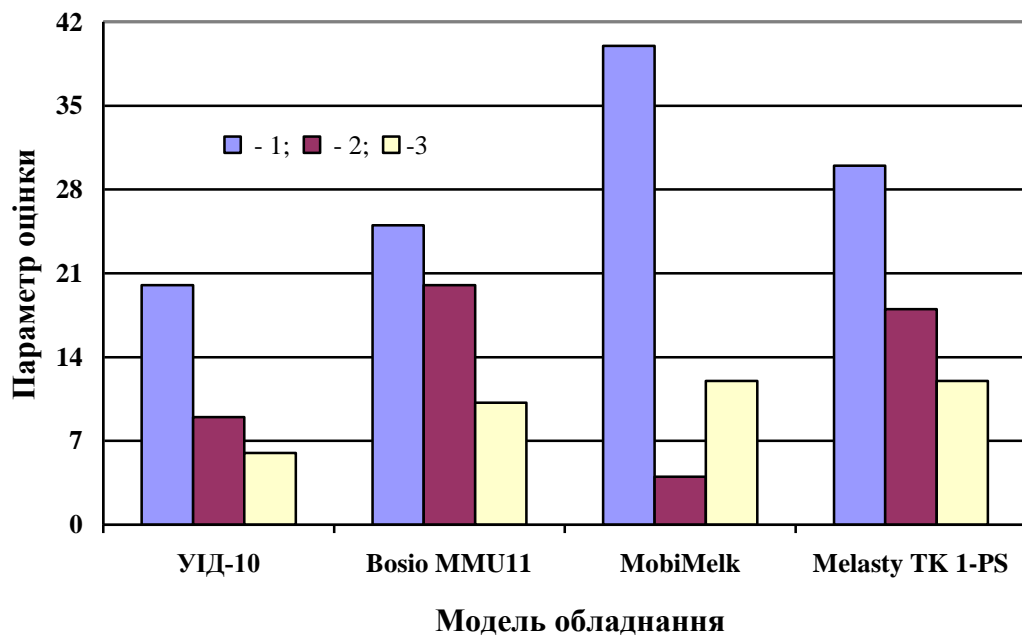


Рис. 1.7. Параметри вакуумної системи малогабаритних доїльних установок з одним доїльним апаратом: 1 – місткість доїльного відра, л.; 2 – об'єм вакуумного балона; 3 – продуктивність вакуумного насоса

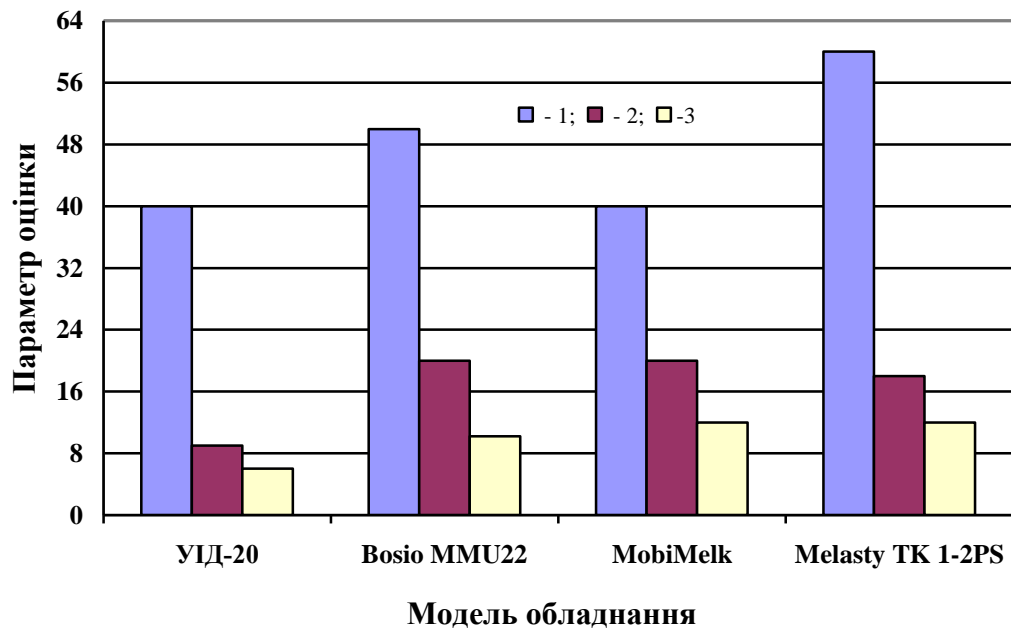


Рис. 1.8. Параметри вакуумної системи малогабаритних доїльних установок з двома доїльними апаратами: 1 – місткість доїльного відра, л.; 2 – об’єм вакуумного балона; 3 – продуктивність вакуумного насоса

Різноманітність параметрів (рис. 1.7 та 1.8) та конструктивних схем вакуумних систем (рис. 1.5) малогабаритних доїльних установок вказує на відсутність одностайної думки серед фірм-виробників щодо конкретного ефективного рішення. Логічним може бути рішення збільшувати об’єм молочного відра (або їх кількість) за умови одночасного використання двох доїльних апаратів, наприклад для таких марок як УІД, Bosio MMU та Melasty ТК. Але решта геометричних та технологічних параметрів (об’єм вакуумного балона, продуктивність вакуумного насоса), для вказаного обладнання, залишаються незмінними, як за умови одного доїльного апарата. Відмінність спостерігається для доїльного обладнання MobiMelk, об’єм вакуумного балона за умови одного доїльного апарата становить 4 л., порівняно із 20 л. для двох доїльних апаратів.

При цьому питомих значення показників можна використати для порівняльної оцінки малогабаритних доїльних установок. Відповідно до досліджень [19] показник питомої продуктивності вакуумного насоса на

одиницю об'єму вакуумної системи може характеризувати стабільність вакуумметричного тиску під час доїння корів.

Таблиця 1.2

Питомі показники малогабаритних доїльних установок

Модель обладнання	Питома продуктивність вакуумного насоса, год ⁻¹	Питома металомісткість, кг/м ³	Питома енергомісткість, кВт/м ³
УІД-10	0,207	1,965	0,0224
УІД-20	0,122	1,326	0,0133
Bosio MMU11	0,227	1,488	0,0166
Bosio MMU22	0,145	1,171	0,0107
MobiMelk	0,200	1,000	0,0125
ELMAS-1	0,327	1,454	0,0166
Melasty ТК 1-PS	0,250	1,104	0,0114
Melasty ТК 1-2PS	0,154	0,820	0,0071

З економічного та експлуатаційного погляду найбільш доцільними можна вважати варіанти з мінімальними значеннями питомої енерго- та металомісткості технологічного процесу машинного доїння корів. Малогабаритні доїльні установки з мінімальним об'ємом вакуумного балона (наприклад, ELMAS-1) мають перевагу за показником питомої продуктивності вакуумного насоса, що очевидно, але поступаються за рештою показників. З технологічної точки зору, найбільш доцільним буде варіант з найвищим значенням питомої продуктивності вакуумного насоса.

Малогабаритна доїльна установка із паралельно-дотичним просторовим розміщенням патрубків вакуумного насоса та вакуум-проводу відносно вакуумного балона (Melasty ТК) характеризується найкращими значеннями розглянутих у табл. 1.2 питомих показників.

Отже, вакуумна система повинна забезпечити заданий технологічний режим роботи малогабаритної доїльної установки. Тому конструкційні та геометричні особливості її структурно-функціональної схеми можуть мати важливе значення щодо підвищення ефективності машинного доїння. У зв'язку

із цим задачі досліджень є актуальними та важливими для машинобудівників та галузі тваринництва в цілому.

1.3 Висновки до розділу 1

1. Малогабаритні доїльні установки, котрі представлені на вітчизняному ринку різними фірмами-виробниками, мають відмінні характеристики параметрів складових вакуумної системи стосовно об'єму вакуумного балона, об'єму молочного відра та продуктивності вакуумного насоса. Це викликає суттєве варіювання щодо питомих показників ефективності функціонування обладнання та неможливості виділити оптимальні значення для загальноприйнятих рекомендацій.

2. Малогабаритні доїльні установки відрізняються за способом та схемою поєднання компонентів вакуумної системи між собою, а також послідовність такого поєднання. Найбільшої відмінності набула схема під'єднання патрубків вакуумного насоса та вакуумної магістралі до вакуумного балона. Тому така особливість може впливати на питомі показники функціонування вакуумної системи та ефективність машинного доїння в цілому.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО КОМПОНУВАННЯ ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ МАЛОГАБАРИТНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Теоретичні передумови удосконалення вакуумної системи малогабаритної доїльної установки

Оцінити сукупні втрати тиску можна за допомогою діаграми розподілу абсолютних значень тисків у вакуумній мережі стосовно конструктивно-технологічної схеми вакуумної системи (рис. 2.1) [20].

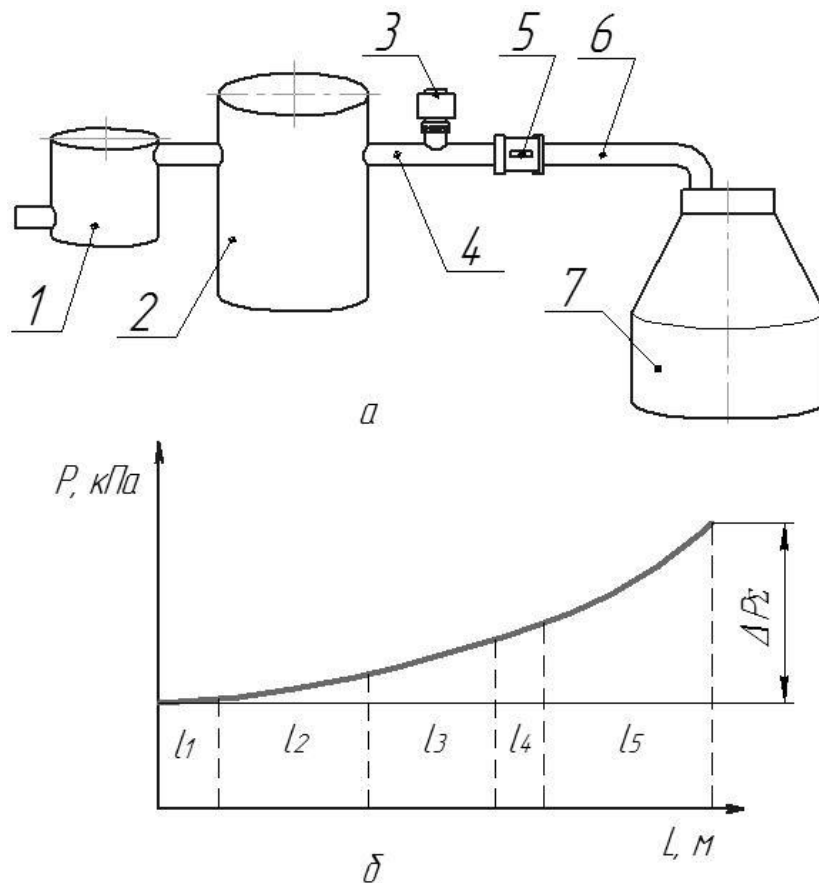


Рис. 2.1. Компонувальна схема вакуумної системи малогабаритної доїльної установки (а), діаграма зміни абсолютного тиску (б): 1 – вакуумний насос; 2 – вакуумний балон; 3 – вакуумний регулятор; 4 – вакуум-провід; 5 – вакуумний кран; 6 – повітропровід; 7 – молокоприймальна місткість; $l_{1,2,3,4,5}$ – характерний розмір ділянки елемента вакуумної системи

На рис. 2.1. подана схема послідовного поєднання компонентів вакуумної системи. Вакуумна система малогабаритної доїльної установки включає складові компоненти, кожен із яких характеризується своїм впливом на загальні втрати тиску в абсолютному вимірі (рис. 2.1., б). Конструкційний елемент вакуумної системи створює опір потоку повітря, для подолання якого тиск у наступному перерізі має бути вищим ніж у попередньому (рис. 2.1). Тиск в кінці вакуумної мережі можна визначити наступним чином [20]:

$$p_2 = p_1 + \Delta p_{\Sigma}, \quad (2.1)$$

де p_1, p_2 – відповідно, тиск на початку та у кінці мережі, Па;

Δp_{Σ} – сумарні втрати тиску на подолання опорів конструктивних елементів (лінійних та місцевих) повітропровідної системи, Па.

Загальний опір потоку повітря є величиною оберненою до сукупної провідності U_{Σ} , відповідно до рекомендацій [21, 22, 23], можна записати, м³/с:

$$U_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{Q_s}{(p_2 - p_1)} = \frac{Q_s}{\Delta p_{\Sigma}}, \quad (2.2)$$

де Z_{Σ} – сукупний опір складових вакуумної системи потоку повітря є величиною оберненою до об'ємної витрати повітря, с/м³;

Q_s – потік повітря через повітропроводи вакуумної мережі, Па×м³/с;

$(p_2 - p_1)$ – різниця тисків у кінці і на початку вакуумної мережі, Па.

З врахуванням стаціонарного потоку повітря [21, 23] через складові елементи вакуумної системи, тиск в кінці повітропровідних елементів вакуумної системи можна встановити за залежністю:

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot Q_{V1}}{U_{\Sigma}} + p_1, \quad (2.3)$$

де Q_{V1} – об'ємна витрата повітря на початку вакуумної мережі, м³/с.

Використовуючи залежність (2.3) можна встановити тиск у кінцевій точці вакуумної мережі за відомими значеннями провідності елементів вакуумної

системи, оскільки чисельник має однакове значення для кожної складової наведеної на рис. 2.1. схемі.

Відповідно до залежності (2.2) сумарна провідність (U_{Σ}) вакуумної мережі буде збільшуватись за умови зниження втрати тиску (Δp_{Σ}). У зв'язку із цим варто komponувати вакуумну систему елементами котрі характеризуються найвищою провідністю. Важливим може бути і використаний спосіб та послідовність поєднання елементів вакуумної системи між собою, що потребує додаткових досліджень.

2.2. Дослідження зміни рівня тиску залежно від способів поєднання вакуумної лінії та вакуумного балона

Розглянемо типові схеми поєднання вакуумного балона із патрубками вакуумного насоса та вакуумної мережі (рис. 2.2.).

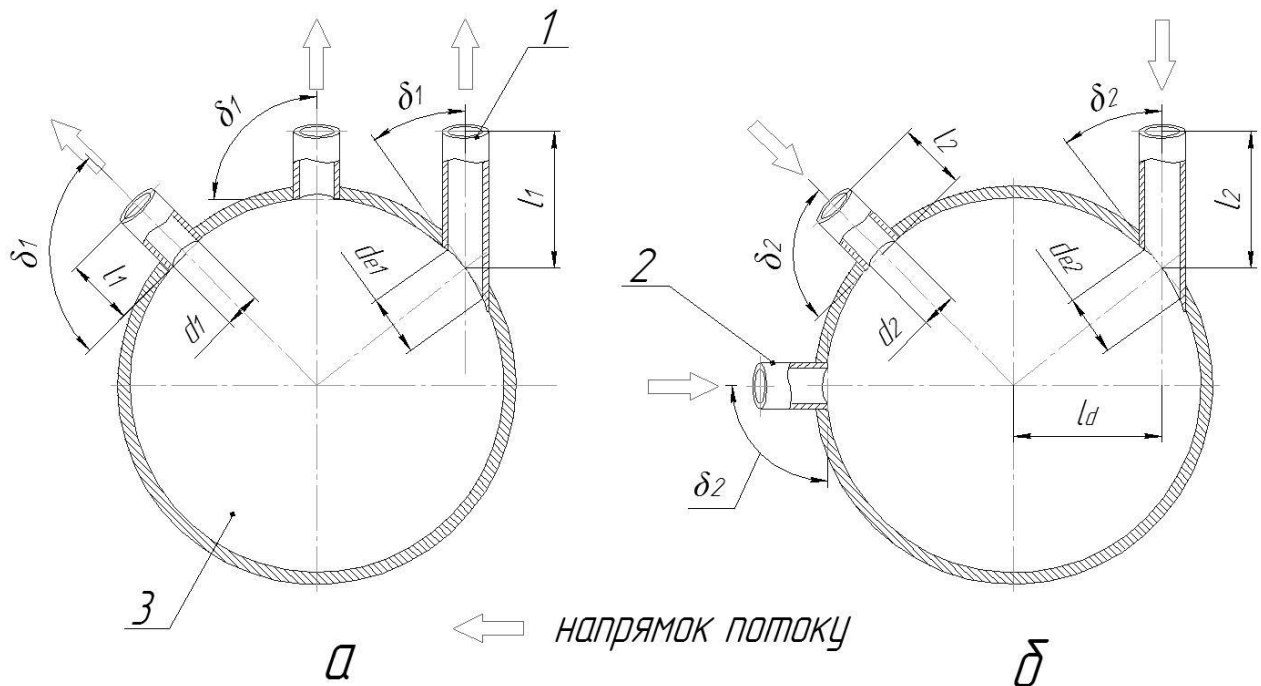


Рис. 2.2. Схеми приєднання до вакуумного балона: 1 – патрубок вакуумного насоса; 2 – патрубок вакуум-проводу; 3 – вакуумний балон

Встановимо тиск у кінцевому перерізі патрубка вакуумного насоса 2, відповідно до схеми на рис. 2.2, з врахуванням рівняння (2.3) запишемо:

$$p_n = p_p + \frac{Q_{Sp}}{U_\Sigma}, \quad (2.4)$$

де Q_{Sp} , – потік повітря через патрубок, Па×м³/с;

U_Σ – сумарна провідність патрубк довжиною l_1 (U_{l1}) та отвору вакуумного балона на вході в патрубок (U_{d1}), м³/с;

p_p – тиск у вхідному перерізі вакуумного насоса, Па.

Дослідники [23, 24, 25, 26] встановили ряд залежностей для визначення провідності циліндричних трубопроводів, але вони працюють лише за умови відповідності потоку, що підкоряється закону Пуазейля [27, 28, 29] (додаток А). Нами модернізована залежність, яка в повній мірі враховує втрати тиску на тертя по довжині трубопроводу та місцеві опори у вигляді згинів та особливостей поєднання трубопроводу з іншими елементами. Оскільки відомо, що $R_0/M=R=287,1$ Дж/кг×К [28, 29], а середня довжина вільного пробігу молекули повітря та його температура пов'язуються коефіцієнтом b_ϵ [27], модифікована залежність визначення провідність трубопроводу довжиною l_1 , матиме вигляд:

$$U_{l1} = 85,5 \frac{d_1^4 \cdot \sqrt{T}}{(l_1 + l_{екв}) \cdot b_\epsilon} \cdot \frac{p_p + p_{l1}}{2}, \quad (2.5)$$

де 85,5 – коефіцієнт узгодження сталих величин (R, L_j), с⁻¹К^{-1/2}Па⁻¹;

T – температура повітря, К;

d_1 – діаметр патрубк, м;

l_1 – довжина патрубк, м;

$l_{екв}$ – ступінь збільшення довжини трубопроводу при наявності місцевого опору (наприклад, коліно), приймається за рекомендаціями [33], м;

b_ϵ – коефіцієнт кінетичної енергії молекул повітря, $b_\epsilon=1$ при температурі повітря $T=273,15$ К, $b_\epsilon=1,095$ при температурі повітря $T=293,15$ К [27];

p_{l1} – тиск у кінцевому перерізі патрубк l_1 , Па.

Відповідно до рівняння (2.4), справедлива формула:

$$(p_{l1} - p_p) \cdot U_{l1} = Q_{Sp}. \quad (2.6)$$

Підставимо у рівняння (2.6) рівняння (2.5), отримаємо формулу для визначення тиску в кінці патрубку, без врахування опору перерізу отвору:

$$p_{l1} = \sqrt{\left(\frac{Q_{Sp} \cdot (l_1 + l_{екв}) \cdot b_{\varepsilon}}{42,75 \cdot d_1^4 \cdot \sqrt{T}} \right)^2 + p_p^2}, \quad (2.7)$$

Так як геометричні параметри вакуумного балона значно більші за діаметр трубопроводу, відповідно до рекомендацій [23, 25, 33], нехтуємо швидкістю повітря в вакуумному балоні. Тому, тиск у перерізі отвору при напрямку потоку повітря від вакуумного балона до патрубка, з врахуванням рівняння (2.1), можна визначити за формулою:

$$p_{d1} = p_{l1} + \Delta p_{омв}, \quad (2.8)$$

де $\Delta p_{омв}$ – сумарні втрати тиску на подолання опорів викликаних вхідним перерізом отвору, Па.

Втрати тиску в місцевих опорах визначають за допомогою рівняння Бернуллі [30, 31, 32]:

$$\Delta p_{омв} = \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \cdot \xi_{омв}, \quad (2.9)$$

де $\xi_{омв}$ – коефіцієнт місцевого опору вхідного отвору, [33];

v – швидкість руху повітря у вихідному отворі, м/с;

ρ – густина повітря при тиску p_{l1} , кг/м³.

Втрати тиску в отворах притаманні для коротких трубопроводів, довжина яких відповідає умові $l_1 < 20d_1$. Виразимо швидкість руху повітря через потік ($\frac{Q_s}{p} = v\pi R^2$), а густину повітря через газову сталу відповідно до рівняння стану газу Клапейрона-Менделєєва ($p = \rho \cdot RT$), підставимо у рівняння (2.9), шляхом обробки [36, 39], отримаємо:

$$\Delta p_{ome} = \frac{\left(\frac{Q_s}{\pi \cdot d_1^2 \cdot p_{l1}} \right)^2 \cdot \frac{p_{l1}}{RT}}{2} \cdot \xi_{ome} = 2,83 \cdot 10^{-3} \frac{Q_s^2}{p_{l1} \cdot d_1^4 \cdot T} \cdot \xi_{ome}, \quad (2.10)$$

де $2,83 \times 10^{-3}$ – коефіцієнт відомих величин за нормальних умов, $\frac{c^2 \times K}{m}$.

Втрати тиску в отворі d_1 (див. рис. 2.2, а) залежить від опору потоку повітря на вході у трубопровід, відповідно рекомендацій [33] запишемо:

$$\xi_{ome} = 0,5 + 0,3 \cos \delta_1 + 0,2 \cos^2 \delta_1, \quad (2.11)$$

де δ_1 – кут між віссю труби та дотичною до стінки вакуумного балона, якщо $\delta_1=90^0$, то $\xi_{ome}=0,5$, якщо $\delta_1=45^0$, то $\xi_{ome}=0,80$, якщо $\delta_1=20^0$, то $\xi_{ome}=0,96$, для круглих перерізів [33].

У вакуумних систем малогабаритних установок УІД, Vosio та Melasty поєднання вакуумного балона та вакуумного насоса здійснюється трубопроводом під кутом $\delta_1=90^0$. Що стосується доїльної установки MobiMelk, то трубопровід має коліно із деяким радіусом згину, що може впливати на рівень втрат тиску за рахунок зростання довжини на еквівалентну складову. Цілком можливе приєднання до вакуумного балона трубопроводу під кутом меншим від 90^0 (див. рис. 2.2, а). В такому випадку діаметр d_1 у рівнянні (2.10) замінюється на його еквівалентну величину d_{1e} , з ідентичною площею перерізу.

Провідності трубопроводу, що поєднує вакуумний насос та вакуумний балон залежить від геометричних параметрів та конструктивних особливостей (рис. 2.3), визначається за формулою [25, 26]:

$$U_n = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{l1}} + \frac{1}{U_{d1}} \right)} = \frac{Q_{sp}}{p_{d1} - p_p}, \quad (2.12)$$

де U_{l1} – провідність трубопроводу довжиною l_1 , m^3/c ;

U_{d1} – провідність отвору d_1 на вході в трубопровід l_1 , m^3/c .

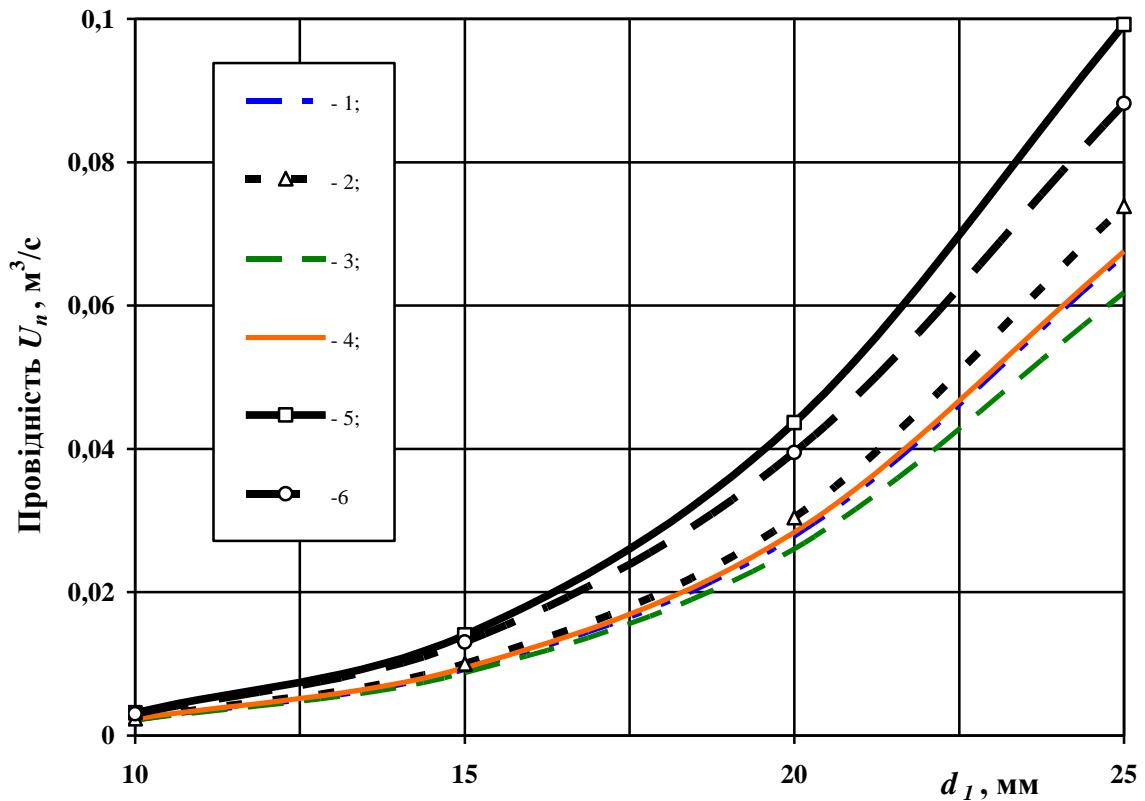


Рис. 2.3. Залежність провідності трубопроводу $l_1=0,2$ м від геометричних параметрів та умов поєднання з вакуумним балоном: 1 – прямолінійний при $\delta_l=90^\circ$; 2 – прямолінійний при $\delta_l=45^\circ$; 3 – наявність коліна при $\delta_l=90^\circ$; 4 – наявність коліна при $\delta_l=45^\circ$; 5 – прямолінійний при $\delta_l=25^\circ$; 6 – наявність коліна при $\delta_l=25^\circ$.

Трубопровід з діаметром $d_1=10$ мм характеризується найменшою провідністю. Зі збільшенням діаметра трубопроводу зростає його провідність, що пояснюється зменшенням втрат тиску по його довжині. Суттєвий вплив на провідність трубопроводу чинить кут установки (δ_l) його до твірної вакуумного балона. Так, за умови кута установки $\delta_l=45^\circ$ провідність зростає на 9–10%, а при $\delta_l=25^\circ$ провідність зростає на 44–48%, порівняно із $\delta_l=90^\circ$. Це можна пояснити зменшенням втрат тиску ($\Delta p_{омв}$) у вхідному перерізі отвору d_{e1} за рахунок збільшення площі поперечного перерізу порівняно із d_1 , хоча коефіцієнт місцевого опору вхідного отвору ($\xi_{омв}$) збільшується зі зменшенням кута установки. Наявність коліна оптимального радіусу згину ($R=(1,2-1,5)d_1$, [33]) спричиняє зменшення провідності на 8–11% за рахунок незначного зростання

втрат тиску на 1,5–2%, порівняно із прямолінійним трубопроводом аналогічної довжини.

Розглянемо особливості поєднання вакуум-проводу 2 до вакуумного балона (див. рис. 2.2, б). Відповідно до рекомендацій Розанова [27] у місцях переходу із меншого діаметра у значно більший, додатковим опором потоку можна знехтувати. Кузнецов [34] пов'язує це з великою пропускною здатністю вхідного отвору з меншого в більший об'єм. Відповідно до досліджень [33] втрати тиску в місці приєднання труби довжиною l_2 (див. рис. 2.2, б) до стінки вакуумного балона є не суттєвими. Оскільки кут (δ_2) приєднання труби довжиною l_2 до стінки вакуумного балона також не має впливу на втрати тиску [33], вхідний тиск потоку у вакуумний балон буде рівним p_{d1} .

Тиск (p_{l2}) на вході в трубопровід довжиною l_2 (див. рис. 2.2, б) визначається аналогічно до рівняння (2.4) за формулою:

$$p_{l2} = \sqrt{\left(\frac{Q_{Sp} \cdot (l_2 + l_{екв}) \cdot b_\varepsilon}{42,75 \cdot d_2^4 \cdot \sqrt{T}} \right)^2 + p_{d1}^2}, \quad (2.13)$$

Вакуумний кран 5 (див. рис. 2.1, б) у структурі вакуумної системи сприяє втратам тиску. На основі рекомендацій [30, 33] та отриманих рівнянь (2.8–2.9), тиск у вхідному перерізі крана (p_{l4}) визначимо наступним чином:

$$p_{l4} = \sqrt{p_{l2}^2 + 5,65 \cdot 10^{-3} \frac{\xi_k \cdot Q_{Sp}^2}{d_k^4 \cdot T}}, \quad (2.14)$$

де ξ_k – коефіцієнт опору крана, приймається за рекомендаціями [33];

d_k – діаметр прохідного перерізу крана, м.

Загальну провідність вакуумної мережі при послідовному поєднанні складових, з врахуванням положень [26], визначимо за допомогою залежності:

$$U_\Sigma = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{l1}} + \frac{1}{U_{d1}} + \frac{1}{U_{l2}} + \frac{1}{U_{l4}} + \frac{1}{U_{l5}} \right)} = \frac{Q_{Sp}}{p_{l5} - p_p}, \quad (2.15)$$

де U_{l2} – провідність трубопроводу довжиною l_2 (див. рис. 2.2, б), м³/с;

U_{14} – провідність крана (див. рис. 2.1, б), м³/с;

U_{15} – провідність гнучкого повітропроводу (визначається за допомогою рівняння (2.12)), м³/с;

P_{15} – тиск на вході у гнучкий повітропровід l_5 (див. рис. 2.1, б), Па.

Під час конструювання вакуумної мережі важливо визначати її провідність. Якщо провідність вакуумної мережі буде вищою за продуктивність вакуумного насоса, то така система буде працювати з мінімальними втратами тиску на подолання опорів конструкційних елементів.

2.3. Методика експериментального дослідження вакуумної системи малогабаритної доїльної установки

Метою досліджень є встановлення впливу конструкційних та геометричних параметрів структурних елементів та способу їх поєднання на провідність вакуумної системи малогабаритної доїльної установки. Під час проведення досліджень керувались ДСТУ ISO 6690:2004 та СОУ 74.3-37-273:2005 [35, 37, 38, 40, 41]. Програма досліджень передбачала визначення впливу геометричних параметрів структурних елементів вакуумної системи на втрати тиску. При цьому було реалізовано багатофакторний експеримент.

Продуктивність вакуумного насоса (Q_{vp}) повинна бути узгоджена з провідністю вакуумної системи (U_{Σ}), яка характеризується опірністю складових повітряному потоку. В наслідок чого виникають падіння тиску, величина яких не повинна перевищувати можливостей вакуумного насоса. Тому, різні конструкційно-геометричні параметри структурних елементів малогабаритної доїльної установки спричиняють відмінні значення втрат тиску (Δp) між початковим та кінцевим перерізами вакуумної мережі. Відповідно до рівняння (2.15), необхідну продуктивність вакуумного насоса можна оцінити за формулою:

$$Q_{vp} = \frac{U_{\Sigma}(p_{15} - p_p)}{p_p}. \quad (2.16)$$

Сукупна провідність вакуумної системи (U_{Σ}), характеризується місцевими та лінійними втратами у конструкційних елементах, що впливає на швидкість встановлення робочого тиску у молочному відрі. Чим вища провідність системи, тим швидше встановиться робочий вакуумметричний тиск. Досліди проводились з трикратною повторюваністю для кожної конкретної конструкційно-геометричної характеристики елементів вакуумної мережі для початкового значення вакуумметричного тиску вакуум-проводу на рівні 50 кПа. Результати вимірювань оброблялись за допомогою загальнодоступного програмного забезпечення.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Величина потоку повітря вакуумною мережею, відповідно до умови нерозривності потоку (Q_s), завжди постійна, тому тиск в кінці вакуум-провідної мережі буде визначатись її сумарною провідністю (U_{Σ}). За умови зростання сукупної провідності знижуються втрати тиску (Δp_{Σ}), тому необхідно komponувати вакуумну систему елементами котрі характеризуються найвищою провідністю. Це стосується вибору типів вакуумних кранів, підбору матеріалу трубопроводів, встановлення оптимальної довжини трубопроводів і т.д.

2. Суттєвий вплив на провідність трубопроводу чинить кут установки (δ_l) його до твірної вакуумного балона. За умови кута установки $\delta_l=45^\circ$ провідність зростає на 9–10%, а при $\delta_l=25^\circ$ провідність зростає на 44–48%, порівняно із $\delta_l=90^\circ$. Це можна пояснити зменшенням втрат тиску (Δp_{ome}) у вхідному перерізі отвору d_{e1} за рахунок збільшення площі його поперечного перерізу. Згин трубопроводу з оптимальним радіусом згину спричиняє зменшення провідності лише на 8–11%.

РОЗДІЛ 3

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МАЛОГАБАРИТНОЇ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

3.1. Встановлення ефективності удосконаленої конструкційно-технологічної схеми вакуумної системи

Теоретичні дослідження проведені у попередньому розділі доводять значний вплив геометричних параметрів повітропровідних елементів та конструкційного способу поєднання вакуум-проводу з вакуумним балоном на сукупні втрати тиску. Для оцінки характеру впливу були проведені експериментальні дослідження при яких основними незалежними факторами впливу обрали кут поєднання вакуум-проводу з вакуумним балоном. Для порівняльних досліджень використовувались конструкційно-геометричні схеми вакуумних систем серійної малогабаритної доїльної установки УІД-10 та удосконаленої схеми (рис. 3.1).

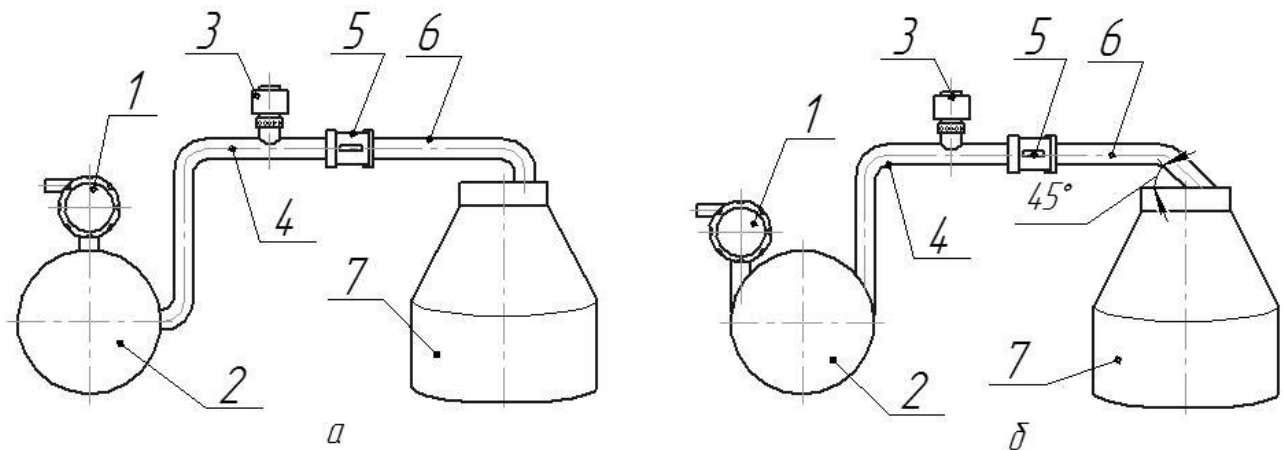


Рис. 3.1. Досліджувані схеми вакуумної системи серійної малогабаритної установки УІД-10 (а) та удосконаленого варіанту (б): 1 – вакуумний насос; 2 – вакуумний балон; 3 – вакуумний регулятор; 4 – вакуум-провід; 5 – вакуумний кран; 6 – повітропровід; 7 – молокоприймальна місткість

Відмінність досліджуваних схем вакуумних систем проявлялась у різній довжині вакуум-проводу та гнучкого повітропроводу, що поєднує вакуумний балон з молочним відром. Присутність у конструкції вакуумних систем різного типу та кількості місцевих опорів у вигляді згинів та колін може визначати результат досліджень як додатковий фактор.

Для отримання співставних результатів, в кожному конкретному експерименті об'єм вакуумного балона та тиск системи на рівні 50 кПа залишали незмінними. За результатами проведених досліджень отримали масив експериментальних даних, оброблення яких дозволило отримати рівняння регресії для досліджуваних схем вакуумної системи.

Рівняння регресії за результатами отриманих експериментальних даних для серійної малогабаритної доїльної установки має вигляд:

$$U_{\text{ВД-10}} = 0,0022d^2 - 0,005d + 0,0037, \quad (3.1)$$

де U – провідність вакуумної системи, м³/с;

d – діаметр повітропроводу вакуумної системи, м.

Оцінка достовірності взаємозв'язку змінних у рівнянні (3.1) виконувалась за коефіцієнтом детермінації, величина якого ($R^2=0,998$) вказує на досить високий функціональний взаємозв'язок обраних змінних.

За результатами отриманих експериментальних даних встановили рівняння регресії для пропонованого варіанту вакуумної системи малогабаритної доїльної установки:

$$U_{\text{мод.}} = 0,0027d^2 - 0,0058d + 0,0043, \quad (3.2)$$

Коефіцієнт детермінації $R^2=0,999$ вказує на досить високий функціональний взаємозв'язок обраних змінних, тобто маємо високу достовірність отриманого рівняння.

Порівняльну оцінку вакуумних систем, серійної та модернізованої, зручно проводити за допомогою графічних залежностей (рис. 3.2) побудованих на основі аналізу результатів експериментальних досліджень.

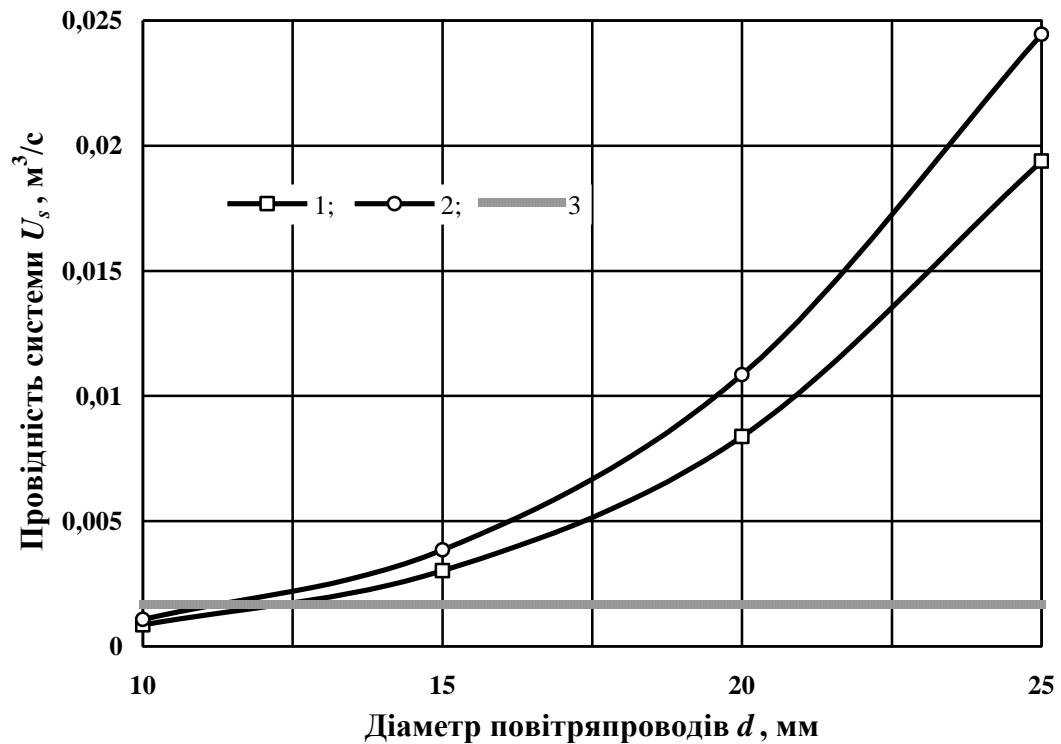


Рис. 3.2. Залежність провідності вакуумної системи малогабаритної доїльної установки від конструкційно-геометричних особливостей: 1 – серійна установка УІД-10; 2 – пропонується вакуумна система (див. рис. 3.1, б); 3 – продуктивність вакуумного насоса $0,001667 \text{ м}^3/\text{с}$ за умови сукупної довжини повітропроводів $l=0,7 \text{ м}$.

Відповідно до рис. 3.2, повітропроводи в діапазоні діаметрів $d=10\text{--}12 \text{ мм}$ не можуть бути використанні у конструюванні вакуумної системи, оскільки вони мають недостатньою провідність для безпечного режиму роботи малогабаритної доїльної установки. Це викликано значними втратами тиску, тому продуктивності вакуумного насоса буде недостатньо для компенсації втрат тиску у конструкційних елементах з мінімальним діаметром.

Пропонується конструкція вакуумної системи (див. рис. 3.1, б) досконаліша від серійної оскільки має вищий на 25–26% рівень провідності в діапазоні досліджуваних діаметрів та однакової довжини повітропроводів вакуумної мережі. Збільшення довжини повітропроводів менш суттєво впливає

на провідність вакуумної системи в цілому. Так, наприклад, при збільшенні довжини повітропроводів на 100 мм, провідність зменшується лише на 5,7% для діаметра 20 мм.

Таким чином, раціональна конструкційна схема вакуумної системи малогабаритної доїльної установки визначається її мінімальними втратами тиску та продуктивністю вакуумного насоса, яка не повинна перевищувати сукупної провідності. Рівень тиску в кінцевому перерізі вакуумної мережі визначає швидкодію вакуумної системи, зі збільшенням тиску зростає час встановлення робочого режиму малогабаритної доїльної установки.

3.2. Висновки до розділу 3

1. Присутність у конструкції вакуумних систем різного типу та кількості місцевих опорів у вигляді згинів та колін визначає результат сукупної провідності. Запропонована конструкційно-геометрична схема удосконаленої вакуумної системи забезпечує на 25% вищу провідність порівняно із серійною малогабаритною доїльною установкою. Це відповідає пропорційному рівню зниження втрат тиску, що викликані конструкційними елементами вакуумної системи.

2. Вища провідність вакуумної системи малогабаритної доїльної установки дозволяє скоротити на 4–8% час встановлення робочого вакуумметричного тиску у молочному відрі. При цьому позитивним є зниження амплітуди коливань тиску у вакуумній мережі при нестандартних процесах.

ВИСНОВКИ

1. Малогабаритні доїльні установки мають відмінні характеристики параметрів складових вакуумної системи стосовно об'єму вакуумного балона, об'єму молочного відра та продуктивності вакуумного насоса. Це викликає суттєве варіювання щодо питомих показників ефективності функціонування обладнання та неможливості виділити оптимальні значення для загальноприйнятих рекомендацій. Найбільшої відмінності набула схема під'єднання патрубків вакуумного насоса та вакуумної магістралі до вакуумного балона. Тому така особливість може впливати на питомі показники функціонування вакуумної системи та ефективність машинного доїння в цілому.

2. Продуктивність вакуумного насоса не в змозі компенсувати втрати тиску у вакуумній мережі при недостатній провідності повітропроводів. Дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив на провідність трубопроводу чинить кут установки його до твірної вакуумного балона. За умови кута установки $\delta_I=45^\circ$ провідність зростає на 9–10%, а при $\delta_I=25^\circ$ провідність зростає на 44–48%, порівняно із $\delta_I=90^\circ$. Це можна пояснити зменшенням втрат тиску у вхідному перерізі отвору за рахунок збільшення площі поперечного перерізу, хоча коефіцієнт місцевого опору вхідного отвору збільшується зі зменшенням кута установки. Згин трубопроводу з оптимальним радіусом згину спричиняє зменшення провідності лише на 8–11%.

3. Результати досліджень вказали, що запропонована конструкційно-геометрична схема удосконаленої вакуумної системи забезпечує на 25% вищу провідність порівняно із серійною малогабаритною доїльною установкою. Це відповідає пропорційному рівню зниження втрат тиску, що викликані конструкційними елементами вакуумної системи. Вища провідність вакуумної системи малогабаритної доїльної установки дозволяє скоротити на 4–8% час встановлення робочого вакуумметричного тиску у молочному відрі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДеЛавль: Двигатель прогресса в молочном производстве: Каталог.– Київ, 2010. 90 с.
2. Обладнання та супутні товари для молочних ферм: Каталог фірми ДеЛаваль. Київ, 2008. 32 с.
3. Пересувна доїльна установка MobiMelk. веб-сайт.
URL:<http://www.westfalia.com>.
4. Індивідуальні доїльні установки. веб-сайт.
URL:<http://www.bratslav.com>.
5. Установки індивідуального доїння УІД-10 та УІД-20. веб-сайт.
URL:<http://www.agrotechnika-ukr.com.ua>.
6. Медведський О. В., Кухарець С. М. Оцінка ефективності засобів механізації доїння корів в умовах дрібнотоварного виробництва. *Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту*. 2011. Т. 1, № 2 (29). С. 203–209.
7. 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.
8. Вакуумний балон доїльної установки : пат. 70036 Україна : МПК А01J5/00. № u 2011 13177 ; заявл. 08.11.2011 ; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
9. 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.
10. Карташов Л. П. Машинное доение коров. М. : Колос, 1982. 301 с.
11. Семенов Ю. П., Жилов И. В. Влияние вакуумного режима на показатели машинного доения. *Тр. Горьковского СХИ. Совершенствование сельскохозяйственной техники, применяемой в животноводстве*. Горький, 1980. Т. 141. 120 с.

12. Ракецкий П. П. Влияние различных режимов работы доильных аппаратов на молокоотдачу и физиологическое состояние молочной железы коров : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. с.-х. наук. Жодино, 1979. 27 с.

13. Админ Е. И. Доеение коров на фермах промышленных комплексов. К. : Урожай, 1980. 144 с.

14. Админ Е. И. Научные основы технологии машинного доения на фермах промышленного типа : автореф. дис. на соискание учен. степени доктора с.-х. наук. К. : УСХА, 1974. 59 с.

15. Савран В. П. Зоотехнические основы совершенствования технологии и автоматизации доения коров на фермах промышленного типа : автореф. дис. на соискание учен. степени доктора с.-х. наук. К. : УСХА, 1991. 48 с.

16. 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.

17. Влияние низковакуумной доильной системы на состояние вымени коров и качество молока / В. В. Иванцов и др. *Улучшение качества молока и молочных продуктов*. ВАСХНИЛ. М., 1980. 272 с.

18. Бабкин В. П. Механизация доения коров и первичной обработки молока. М. : Агропромиздат, 1986. 271 с.

19. Кухарець С. М., Романишин О. Ю., Медведський О. В. Вплив конструктивно-технологічних параметрів складових вакуумної системи на стабільність режимних характеристик мобільної доїльної установки. *Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту*. 2014. Т. 4, №2 (45), ч.1. С. 290–298.

20. Медведський О. В., Дячук О. В. Вплив елементів вакуумної системи доїльної установки на сукупні втрати тиску. *Біоенергетичні системи : Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції, Житомир, 29 травня. 2020 р.* – Житомир: ЖНАЕУ, 2020. – Ч. 2 – С. 57–59.

21. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. М. : Энергия, 1971. 392 с.

22. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учебник для вузов. 7-е изд., испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
23. Вакуумная техника : справочник. / Фролов Е. С., и др. ; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М. : Машиностроение, 1992. 480 с.
24. Основы вакуумной техники : учебник / Пипко А. И., Плисковский В. Я., Королев Б. И., Кузнецов В. И. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоиздат, 1981. 432 с.
25. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М. : Энергия, 1979. 504 с.
26. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Теоретические основы вакуумной техники. М. : Энергоиздат, 1988. 340 с.
27. Розанов Л. Н. Вакуумная техника : учебник. М. : Высш. шк., 1990. 320 с.
28. Эшбах Г. Л. Практические сведения по вакуумной технике / под общ. ред. Р. А. Нилендера ; пер. с нем. Б. И. Королева. М. : Энергия, 1966. 296 с.
29. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. М. : Энергия, 1971. 392 с.
30. Альтшуль А. Д., Киселев П. Г. Гидравлика и аэродинамика : учеб. пособие для вузов. М. : Стройиздат, 1975. 323 с.
31. Бойко А. В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х. : НТУ «ХП», 2007. 444 с.
32. Штеренлихт Д. В. Гидравлика : учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.
33. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под общ. ред. М. О. Штейнберга. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
34. Кузнецов В. И. Механические вакуумные насосы. М. ; Л. : Энергия, 1959. 280 с.
35. Аністратенко В. О., Федоров В. Г. Математичне планування експериментів в АПК : навч. посібник. К. : Вища шк., 1993. 375 с.

36. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М. : Наука, 1967. 608 с.
37. Вальдман Э. К. Физиология машинного доения коров. Л. : Колос, 1977. 191 с.
38. ИСО 5707–83. Доильные установки. Конструкция и эксплуатационные качества : [Введен с 01.01.83]. М., 1987. 43 с.
39. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике : для науч. работников и инженеров / под общ. ред. И. Г. Арамановича ; пер. с англ. И. Г. Арамановича, и др. М. : Наука, 1973. 832 с.
40. Левин Г. Основы вакуумной техники / под общ. ред. Р. А. Нилендера ; пер. с англ. Н. Б. Шпаро, А. М. Ямпольский. М. : Энергия, 1969. 272 с.
41. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л. : Колос, 1960. 168 с.

Додаток А

Визначення провідності циліндричних трубопроводів

Для визначення провідності трубопроводу (U_T) пропонується [23, 25, 26, 27] наступна залежність:

$$U_T = 0,0309 \frac{d_T^4}{L_1 \cdot l_T} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \cdot \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right),$$

де d_T – діаметр повітропроводу, м;

l_T – довжина повітропроводу діаметром d_T , м;

L_1 – середня довжина вільного пробігу молекули повітря за умови тиску 1 Па та заданої температури T , м \times Па;

R_0 – універсальна газова стала, Дж/кмоль \times К;

M – молярна маса повітря, кг/кмоль;

p_1 – тиск на початку патрубку, Па;

p_2 – тиск в кінці повітропроводу l_T , Па;

Залежить середньої довжини вільного пробігу молекули повітря від температури пов'язується коефіцієнтом b_ε , тобто $L_1^T = L_1^0 \cdot b_\varepsilon$, тому [27]:

$$b_\varepsilon = \frac{L_1^T}{L_1^0} = \frac{T^2 \cdot (T_0 + C_L)}{T_0^2 \cdot (T + C_L)},$$

де L_1^0 , L_1^T – середня довжина вільного пробігу молекули повітря при температурі $T_0=273,15$ К та заданій температурі T , м;

C_L – постійна Сезерленда, для повітря $C_L=112$ К [27].