

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
Розробка конструкції і обґрунтування параметрів клапана доїльного апарата

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-2-23
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Черник Ярослав Віталійович

Керівник: _____ Алієв Ельчин Бахтияр огли

Рецензент: _____ Носенко Євгеній Олегович

Дніпро, 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Освітній ступінь: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Чернику Ярославу Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка конструкції і обґрунтування параметрів клапана доїльного апарата

керівник роботи: Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації тваринництва та існуючих технічних засобів для доїння. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу роботи pinch-клапану доїльного апарата. 3. Методика експериментальних досліджень. 4. Результат експериментальних досліджень. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність удосконаленого доїльного апарата. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (2 аркуша, А4). 3. Аналітичні дослідження (1 аркушів, А4). 4 Експериментальні дослідження (3 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Алієв Е. Б., професор	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 14.11.2024 р	виконано
2	Теоретичний	до 21.11.2024 р	виконано
3	Експериментальний	до 28.11.2024 р	виконано
4	Охорона праці	до 02.12.2024 р	виконано
5	Економічний	до 06.12.2024 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 09.12.2024 р	виконано

Студент

(підпис)

Черник Я. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Алієв Е. Б.

(прізвище та ініціали)

Черник Я. В. Розробка конструкції і обґрунтування параметрів клапана доїльного апарата. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

У роботі проведено комплексне дослідження удосконалення доїльного апарата з акцентом на стабільність вакууму та ефективність Pinch-клапана. У розділі 1 проведено аналіз проблем дестабілізації вакууму, визначено його вплив на продуктивність доїльних установок і розглянуто вимоги до систем підтримки вакууму. Розділ 2 присвячено аналітичним дослідженням роботи Pinch-клапана, включаючи конструкційно-технологічну схему доїльного апарата, теоретичний аналіз падіння вакууму, вибір конструкції запірного клапану та дослідження процесу роботи Pinch-клапана. Методика експериментальних досліджень, описана в розділі 3, включає деталі лабораторного стенду, розробку Pinch-клапана, використання датчиків і системи керування, а також верифікацію експериментів. Розділ 4 представив результати експериментальних досліджень, включаючи попередні результати, результати досліджень Pinch-клапану, випробування крайового випадку та аналіз отриманих даних. Останні два розділи фокусуються на питаннях охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, а також на економічній ефективності удосконаленого доїльного апарата, де оцінюється економічний вигаш від впровадження нових технологій.

Ключові слова: доїльна установка, вакуум, доїльний апарат, Pinch-клапан, параметри, колектор, ефективність.

Апробація. Черник Я. В. (2024). Розробка конструкції і обґрунтування параметрів клапана доїльного апарата. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 134–136.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Аналіз стану дестабілізації вакууму доїльних установок	9
1.2 Вимоги до системи підтримання стабільного вакууму	11
1.3 Висновки з розділу.....	14
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ PINCH-КЛАПАНАУ ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА	15
2.1 Конструкційно-технологічна схема доїльного апарата.....	15
2.2 Теоретичний аналіз падіння вакууму в молочній трубці.....	16
2.3 Вибір раціональної конструкції запірного клапану доїльного апарата	19
2.4 Аналітичні дослідження процесу роботи Pinch-клапана.....	26
2.5 Висновки з розділу	31
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
3.1 Лабораторний стенд для проведення дослідження.....	32
3.2 Розробка Pinch-клапана.....	35
3.3 Датчики і система керування.....	38
3.4 Верифікація	41
4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	43
4.1 Попередні результати	43
4.2 Результати досліджень Pinch-клапану.....	46
4.3 Випробування крайового випадку	51
4.4 Аналіз результатів досліджень.....	52
4.5 Висновки з розділу	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА.....	62
ВИСНОВКИ.....	64
Бібліографія	66
Додатки	73

ВСТУП

Молоко корів використовується людьми вже багато тисячоліть, починаючи з 7000 року до нашої ери. Відтоді розроблялися нові методи доїння, і на сьогодні більшість процесів доїння включають використання доїльних апаратів. Основною мотивацією для розвитку машинного доїння було підвищення ефективності виробництва молока та зменшення трудових витрат на молочних фермах. Розвиток доїльних апаратів розпочався наприкінці 19 століття. Після багатьох років досліджень було виявлено, що найкращим рішенням для машинного доїння є використання двокамерного доїльного стакана з циклічним відкриванням і закриванням дійкової гуми. Ця конструкція дозволяє періодично змінювати тиск у камері доїльного стакана. До навколишньої камери дійкової гуми підключено пульсатор, який створює пульсуючий вакуум, що відкриває дійкову гуму для пропуску молока, а потім закриває її навколо дійки для масажування тканини та зменшення застою. Доїльні стакани підключені колектора, який збирає молоко і транспортує його вниз по молочній трубці. Вакуумний насос безперервно відкачує повітря з системи, що дозволяє молоку переміщатися від колектору до молокозбірника.

Термін «вакуум» відноситься до тиску нижче атмосферного, іноді використовується термін «негативний тиск». У контексті вимірювання доїльного апарата вакуум означає будь-який тиск, нижчий за атмосферний, який визначається як зниження відносно навколишнього атмосферного тиску. Тому вакуумне падіння, про яке йдеться, представляє собою збільшення тиску в доїльній системі з результатом, що все ще нижче атмосферного тиску. У вакуумних системах є пристрої, які регулюють і контролюють вакуум для покращення продуктивності доїння. Типові вакуумні регулятори дозволяють надлишковому повітрю входити в систему або змінювати продуктивність насоса. Навіть якщо вироблений вакуум є стабільним і відрегульованим до очікуваного рівня, у колекторі все одно

спостерігається падіння вакууму. При відсутності потоку молока вакуум у колекторі майже дорівнює повному вакууму системи, але тиск у ньому значно падає, як тільки з'являється молоко і транспортується по молочних трубках. Накопичення молока в колекторі та молочних трубках впливає на вільний потік повітря та призводить до зниження вакууму в доїльних стаканах. Це явище визначається як вакуумне падіння. Коливання та падіння вакууму на кінці дійки регулярно виникають під час машинного доїння внаслідок різних взаємодій між подачею вакууму, рухом дійкової гуми доїльного стакана та потоком молока. Вакуумні падіння, залежні від потоку молока, не можуть бути повністю усунені в поточних системах доїння, оскільки молочна трубка відповідає як за подачу вакууму в колекторі, так і за транспортування видоєного молока в молокозбірник.

Незважаючи на те, що немає наукових доказів, що вакуумні падіння слід повністю уникати, доки залишковий вакуум достатньо високий для належного закриття дійкової гуми, дослідження показали, що мінімальний вакуум у колекторі є головним чинником, який впливає на ефективність доїння, незалежно від рівня вакууму в системі та пов'язаних з ним вакуумних падінь. Існує зворотний зв'язок між швидкістю потоку молока та вакуумом у колекторі: найвищий вакуум у колекторі спостерігається при найнижчій швидкості потоку молока. Стрес на тканини дійки є найбільш значним під час періодів низького потоку молока, коли рівень вакууму на кінці дійки є найвищим. Це може не тільки знизити ефективність доїння через зменшення ефективності видоєння молока, але й погіршити стан дійок і зменшити масажний ефект закритої дійкової гуми на дійку. Щоб вирішити ці проблеми, було запропоновано використати стратегію керування для регулювання вакууму в молочній лінії.

Таким чином, є сенс застосовувати динамічну стратегію управління для регулювання параметрів машини під час доїння окремої тварини. Метою є розробка нового типу електронно-керованого клапана, розташованого в молочній трубці для регулювання вакууму в колекторі за допомогою датчиків тиску.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз стану дестабілізації вакууму доїльних установок

Вивчення процесу стабілізації вакуумного режиму доїльних установок охоплює роботи таких дослідників, як Л.П. Карташов, А.І. Фененко, В.М. Победінський, Н.М. Подолько, В.О. Кітіков, Е.Б. Алієв та інші. У цих роботах стабілізація вакуумного режиму досягається шляхом збільшення обсягу вакуумного балону або системи в цілому, що в свою чергу підвищує продуктивність вакуумних насосів. Однак ці дослідження не повністю розкривають причини флуктуацій вакууму в доїльних установках і не пропонують ефективні рішення для їх усунення.

Всі типи доїльних установок представляють собою складні гідравлічні системи, що містять різні види гідравлічних трактів з відмінними характеристиками. До них відносяться:

1. Молокопроводи для транспортування молочно-повітряної суміші.
2. Вакуумпроводи з однорідним повітряним потоком.
3. Молокозбірники (доярські відра, бідони, молокоміри), де завдяки великому обсягу внутрішнього простору швидкість потоку зменшується, а рідина і газ розділяються.
4. Доїльні апарати, що створюють пульсуючий режим течії молока і повітря.

Гідравлічна система типової доїльної установки не є герметичною і має певний об'єм, що визначає перетікання повітря в систему. Це може бути зумовлено витратами повітря на пульсації, негерметичністю контактів між доїльними стаканами і дійками, перетіканнями повітря при надяганні і знятті доїльних стаканів, а також нещільностями трубопровідних з'єднань. Крім того, в систему потрапляє і молоко, що веде до утворення додаткової газової фази через випаровування.

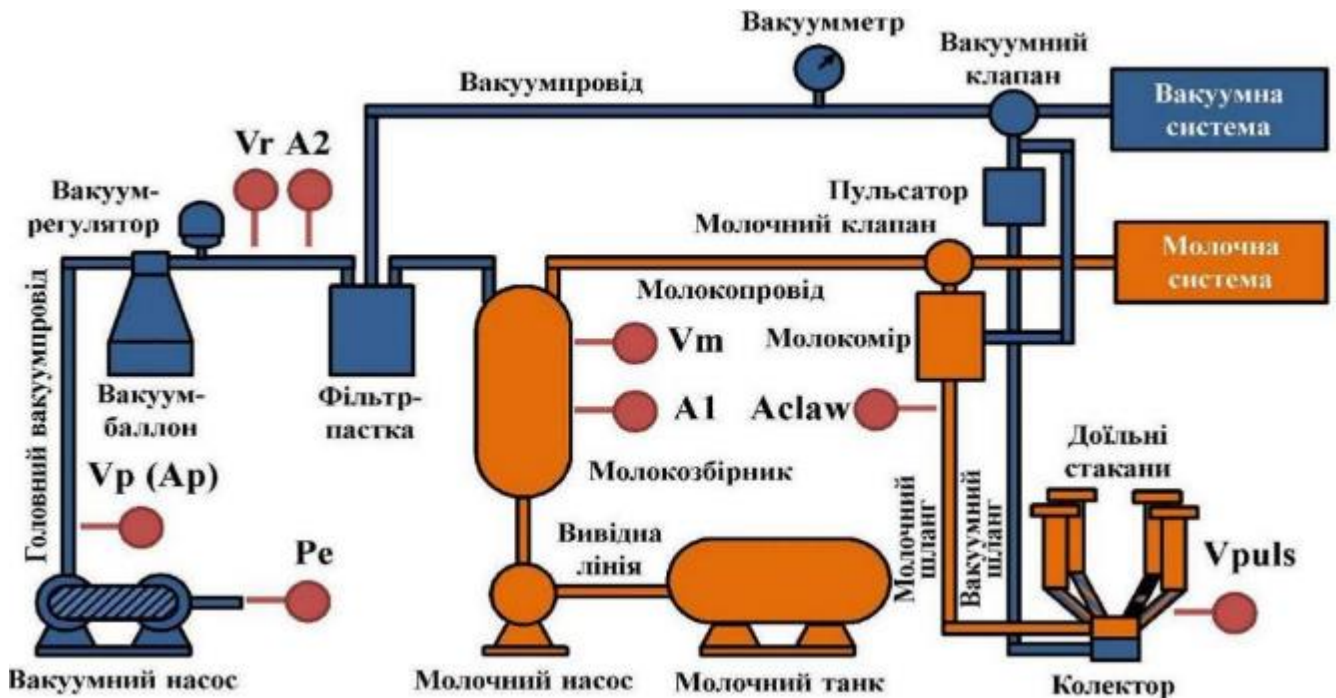


Рисунок 1.1 – Технологічна схема доїльної установки

Вакуум підтримується роботою вакуумного насоса, який компенсує втрати. Нестабільні потоки і постійна робота насоса призводять до необхідності використання регуляторів вакууму, які відкриваються при перевищенні допустимих меж тиску. Це також впливає на витрати повітря.

Аналіз роботи доїльних установок показує, що нестабільність вакууму є наслідком флуктуацій, які поділяються на два типи: перший — через несправності вузлів системи, другий — через нестійкість режимів течії молочно-повітряної суміші. Нестабільність першого типу може бути усунена технічним обслуговуванням, тоді як флуктуація другого типу визначається принциповими особливостями системи доїння.

Для ефективного доїння важливо забезпечити стабільність вакуумного режиму. Невеликі відхилення можуть призвести до збільшення захворювань у корів, зниження їх продуктивності та якості молока. Дослідження показали, що незадовільний вакуумний режим викликає проблеми з молоковіддачею, знижує жирність молока і впливає на загальну продуктивність.

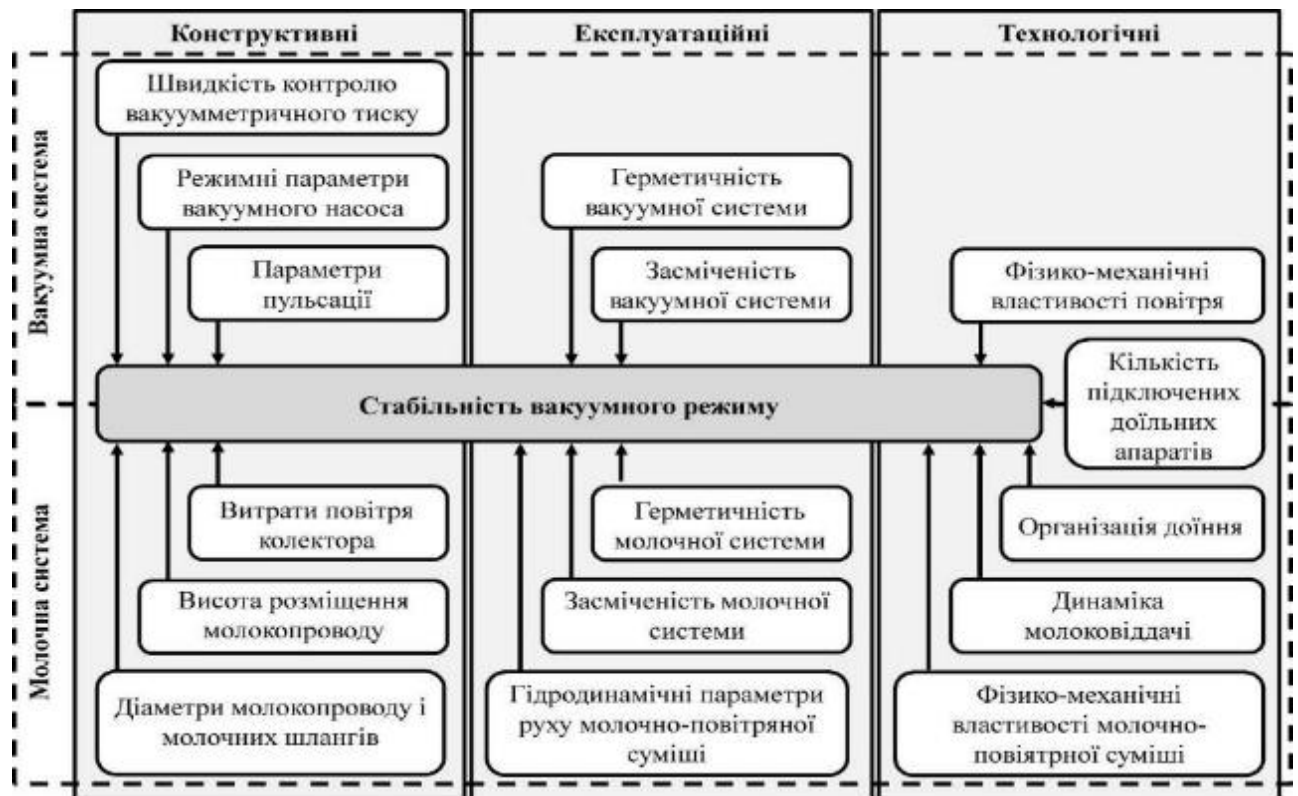


Рисунок 1.2 – Взаємозв'язок параметрів доїльної установки із вакуумом

Згідно з даними досліджень, оптимальний вакуумний режим для доїльних установок варіюється від 42 до 53 кПа, але його нестабільність може негативно вплинути на продуктивність. Необхідно враховувати і технічні характеристики вакуумних насосів для забезпечення постійного рівня вакууму в системі. Резерв повітря, який забезпечує вакуумний насос, повинен бути достатнім для компенсації можливих підсосів і коливань витрати повітря. Загалом, ефективність доїльних машин значною мірою залежить від стабільності вакуумного режиму, і це питання потребує особливої уваги при проектуванні та експлуатації доїльних установок.

1.2 Вимоги до системи підтримання стабільного вакууму

У цьому розділі наведено детальні списки вимог зацікавлених сторін (SR) та технічних вимог (TR).

1. **SR 1:** Новий клапан відсічення має бути розроблений з урахуванням вимог щодо контактів з харчовими продуктами, а падіння вакууму через клапан відсічення має бути менше 1 кПа при 10 л/хв з повністю відкритим клапаном.

2. **SR 2:** Вимоги щодо регулювання вакууму стосуються конфігурації Low line.

3. **SR 3:** Накласти верхню межу на вакуум системи.

TR 1: Максимум 55 кПа.

4. **SR 4:** Небажане зниження вакууму, спричинене потоком молока, має бути зменшене/усунуте за допомогою зворотного зв'язку сенсора до нового клапана відсічення.

TR 2: При потоці 0-10 л/хв і еталонному значенні між 30-50 кПа в колекторі коливання вакууму не повинні перевищувати ± 1 кПа.

TR 3: При потоці 10-14 л/хв і еталонному значенні між 30-50 кПа в колекторі коливання вакууму не повинні перевищувати ± 2 кПа.

5. **SR 5:** Розміщення датчиків та іншої електроніки не повинно обмежувати/впливати на можливість обслуговування обладнання.

TR 4: Конструкція повинна бути модульною (змінні частини).

TR 5: Конструкція повинна бути досить міцною, щоб витримувати вплив води, бруду тощо.

6. **SR 6:** Все нове обладнання, яке буде використовуватися в системі, повинно відповідати нормам щодо контакту з харчовими продуктами (ISO-стандарт 5707:2007).

– Усі компоненти, що піддаються впливу вакууму, повинні бути розроблені та виготовлені так, щоб витримувати мінімальний вакуум 90 кПа без постійної деформації.

– Матеріали, що контактують із молоком, повинні відповідати вимогам до харчових контактних поверхонь. Усі матеріали, що контактують із молоком або розчинами для очищення, незалежно від того, використовуються вони для жорстких або гнучких компонентів, повинні бути виготовлені так, щоб витримувати

максимальну температуру, що використовується в установці, як зазначено в інструкції користувача. Крім того, такі матеріали, якщо вони використовуються відповідно до рекомендацій в інструкції користувача, не повинні надавати молоку стороннього смаку.

– Усі поверхні, що контактують із молоком, повинні бути вільні від гравіювання або тиснення. Усі металеві поверхні, що контактують із молоком, за винятком зварних швів, повинні мати шорсткість поверхні Ra не більше 2,5 мкм відповідно до ISO 4288. Шорсткість поверхні Ra на зварних швах не повинна перевищувати 16 мкм.

– Мідь або мідні сплави не повинні використовуватися в будь-якій частині установки, яка може контактувати з молоком або миючими та дезінфікуючими розчинами, окрім води. Матеріали, які контактують із миючими та дезінфікуючими розчинами при концентраціях нормального використання, повинні бути придатними для такого контакту.

– Матеріали, що контактують із молоком, повинні бути стійкими до молочного жиру та розчинів для очищення та дезінфекції.

7. **SR 7:** Регулювання вакууму має бути протестоване та пройти принаймні один крайовий випадок.

TR 6: Випадок падіння/удару – весь колектор падає з сосків. Зупинити вакуум.

TR 7: Прослизання – доїльні стакани трохи зміщені відносно сосків, що спричиняє підтікання повітря. Контролюйте вакуум, щоб стакани знову правильно вирівнялися.

TR 8: Початок доїння – під час початку доїння створюється тимчасовий повітряний впуск. Кількість і тривалість залежать від навичок доярки, і система регулювання вакууму повинна справлятися з цим випадком.

8. **SR 8:** Повинен бути побудований тестовий стенд, щоб студенти могли проводити тести в КТН і не залежати від знаходження в DeLaval під час процесу тестування.

1.3 Висновки з розділу

1. Дослідження стабілізації вакуумного режиму доїльних установок показують, що збільшення обсягу вакуумного балону або системи може підвищити продуктивність вакуумних насосів. Проте, ці підходи не повністю розкривають причини флуктуацій вакууму і не пропонують ефективних рішень для їх усунення. Нестабільність вакууму в доїльних установках обумовлена як технічними несправностями, так і принциповими особливостями системи доїння.

2. Для забезпечення ефективного доїння і підтримання високої продуктивності корів необхідно забезпечити стабільність вакуумного режиму в доїльних установках. Оптимальний вакуумний режим варіюється від 42 до 53 кПа, і його нестабільність може призвести до проблем з молоковіддачею, зниження жирності молока та загальної продуктивності. Урахування технічних характеристик вакуумних насосів та резерву повітря є критично важливим для підтримки постійного рівня вакууму і покращення якості молока.

3. Розглянуто вимоги до нового клапана відсічення та системи регулювання вакууму в доїльних установках. Зокрема, акцентовано увагу на необхідності мінімізації падіння вакууму через клапан, контролі за коливаннями вакууму при різних потоках молока, а також відповідності матеріалів нормам контактів з харчовими продуктами. Також підкреслено важливість модульної конструкції для обслуговування та тестування обладнання. Зокрема, для досягнення високої ефективності та надійності системи, всі технічні рішення повинні враховувати як стабільність вакууму, так і відповідність стандартам якості матеріалів.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ PИНСН-КЛАПАНУ ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА

2.1 Конструкційно-технологічна схема доїльного апарата

Поточна конструкція доїльного апарата від компанії DeLaval включає молочний колектор, молокомір (витратомір), пульсатор і пневматичний діафрагмовий клапан. Це можна побачити на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Поточна конструкція доїльного апарата від компанії DeLaval

Молочний колектор підключається до дійок корови та з'єднується через молочну трубку з молокоміром, а потім з механічним клапаном відсічення і головною молочною лінією. Для ефективного доїння вакуум під дійками повинен залишатися стабільним протягом усього сеансу. Поточна конструкція клапана відсічення, яка механічно регулює вакуум у молочній трубці, використовуючи мембрану, що відкривається або закривається залежно від різниці між

контрольним вакуумом і вакуумом у молочній трубці. Пульсатор використовується для імітації смоктання телям. Його мета полягає в тому, щоб створити пульсуючий вакуум між дійковою гумою і доїльним стаканом. Разом із цим, невеликий повітряний впуск на колекторі дозволяє молоку переміщуватися. Спосіб керування пульсатором може відрізнятись. Пневматика та електроніка є прикладами, але функціональність залишається тією ж самою. При використанні цієї механічно регульованої вакуумної системи можуть виникати деякі проблеми, що є несприятливими для стабільного рівня вакууму в системі. Деякі з проблем полягають у тому, що клапан відсічення демонструє проблеми з регулюванням, самоколиванням і вбудованим вакуумним падінням (за конструкцією). Конструкція і вибір матеріалів для клапана відсічення обмежені вимогами щодо контакту з харчовими продуктами.

2.2 Теоретичний аналіз падіння вакууму в молочній трубці

На основі рівняння Бернуллі, вакуумні падіння в трубці доїльного апарата можна просто виразити як:

$$\Delta P = (1 - \alpha)\rho_m g H + (1 - \alpha)\lambda\rho_m \frac{L_t}{D} \frac{u_M^2}{2} + (1 - \alpha)\xi\rho_m \frac{L_t}{D} \frac{u_M^2}{2}, \quad (2.1)$$

де ΔP – вакуумне падіння, α – об’ємний повітряний коефіцієнт у довгій молочній трубці, ρ_m – густина молока, H – висота, на яку падає потік молока, L_t – довжина трубки, D – діаметр трубки, u_M – сума зниженої швидкості суміші молока та повітря, λ – коефіцієнт лінійних втрат, який залежить від відносної шорсткості трубки та числа Рейнольдса, і нарешті χ – коефіцієнт місцевих втрат. Вважається, що тиск P_c у колекторі дорівнює робочому тиску P_o плюс вакуумне падіння ΔP . Далі, дослідники визначили об’ємний повітряний коефіцієнт α і спростили рівняння Бернуллі.

Крім того, ці поліноми можна спростити до символічної форми як:

$$\varepsilon_4 x^4 + \varepsilon_3 x^3 + \varepsilon_2 x^2 + \varepsilon_1 x + \varepsilon_0 = 0, \quad (2.2)$$

і для цих поліномів не буде коренів, оскільки ε_0 завжди є додатним сталим значенням, що означає, що вакуумне падіння ніколи не буде дорівнювати нулю незалежно від конструкції системи доїння та потоку молока. Вакуумне падіння також збільшуватиметься зі збільшенням швидкості потоку, як це впливає з рівняння (2.1). Щоб керувати клапаном, також необхідно відчувати поведінку тиску десь у трубці, а не безпосередньо в колекторі.

$$\Delta P = \left(1 - \frac{\frac{Q_a}{A_t} \frac{P_{atm}}{(P_o + \frac{\Delta P}{2})}}{1.2 \left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a}{A_t} \frac{P_{atm}}{(P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right) + v_\infty} \right) \times \left(\rho_m g H + \lambda \rho_m \frac{L_t}{D} \frac{\left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a}{A_t} \frac{P_{atm}}{(P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right)^2}{2} + \xi \rho_m \frac{L_t}{D} \frac{\left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a}{A_t} \frac{P_{atm}}{(P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right)^2}{2} \right) \quad (2.3)$$

де швидкість v_∞ розраховується за формулою:

$$v_\infty = k_1 \sqrt{\left(\frac{g(\rho_m - \rho_a)D}{\rho_m} \right)} \quad (2.4)$$

$$k_1 = 0.345 \left(1 - e^{\frac{-0.01\sqrt{Ar}}{0.345}} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{3.37 - E_o}{M_1}} \right) = 0.345 \left(1 - e^{\frac{-0.01 \sqrt{\frac{g}{(v_m \rho_m)^2} (\rho_m - \frac{P}{RT}) D^3}}{0.345}} \right) \cdot \left(1 - e^{\frac{3.37 - \frac{g}{\sigma} (\rho_m - \frac{P}{RT}) D^2}{M_1(Ar)}} \right) \quad (2.5)$$

де Q_m , Q_a – витрати молока [$\text{кг} \cdot \text{хв}^{-1}$] та повітря [$\text{м}^3 \text{ год}^{-1}$]; D – діаметр трубки для молока [м]; L_t – довжина трубки для молока [м]; P_o – робочий тиск [кПа]; P_{atm} – атмосферний тиск в нормальних умовах [кПа]; ρ_m , ρ_a – густина молока та повітря [кг м^{-3}]; A_t – перетин трубки для молока [м^2]; v_∞ – швидкість підйому однієї бульбашки в спокійній рідині [мс^{-1}]; T – температура [К]; R – газова константа для повітря [$287 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$]; σ – поверхневий натяг рідини [Нм^{-1}].

Ця модель була заснована на таких припущеннях:

– лінійна швидкість є сумою швидкості суміші молока/повітря з коефіцієнтом, що характеризує турбулентний потік (1,2 c_M), і швидкістю підйому однієї бульбашки в спокійній рідині;

– зменшена швидкість повітря потребує приведення реальних умов до нормальних (зміна тиску викликає зміну об'єму газу);

– швидкість підйому однієї бульбашки в спокійній рідині є функцією чисел Архімеда (A_r) та Ейтевеса (E_o), яка, завдяки густині повітря, залежить від тиску в довгій трубці для молока;

– об'ємний коефіцієнт повітря α в трубці для молока є часткою зменшеної швидкості та лінійної швидкості (розрахованої відносно стінок трубки);

– для потоків в довгій трубці для молока можна вважати, що $M_1 = M_1(A_r) = 10$;

– при аналізі значення похідної dv_∞/dp для $g = 9,81 \text{ мс}^{-2}$, $D = 0,019 \text{ м}$, $\rho_m = 1030 \text{ кг м}^{-3}$, $T = 293,15 \text{ К}$, було встановлено, що для варіацій тиску від 45,000 до 60,000 Па похідна приблизно дорівнює $0,6327 \times 10^{-9}$ і є майже постійною;

– нечутливість швидкості підйому однієї бульбашки до змін тиску в проаналізованому завданні зумовлена значеннями густини молока та повітря.

Густина молока $\rho_m = 1030 \text{ кг м}^{-3}$, тоді як густина повітря при атмосферному тиску $P_{\text{atm}} = 101,3 \text{ кПа}$ становить $\rho_a = 1,225 \text{ кг м}^{-3}$. Співвідношення цих значень приблизно 1000:1, тому робочий тиск P_o , швидкість бульбашки або повітря v_∞ можна вважати постійними при певній витраті молока.

Оскільки v_∞ майже постійна при певній витраті молока, то можна зробити заміни $v_\infty = c$ і $\Delta P = x$. Рівняння можна переписати у вигляді поліномів:

$$\begin{aligned} \pi^2 D^4 (x^3 + 4P_o x^2 + 4P_o^2 x) & \left[\frac{24Q_m}{5} (2P_o + x) + \frac{4.8 \times 10^6 Q_a}{5} + c\pi D^2 (2P_o + x) \right] - \\ & \left[\frac{24Q_m}{5} (2P_o + x) + \frac{8 \times 10^5 Q_a}{5} + c\pi D^2 (2P_o + x) \right] \times \\ & \left[\rho_m g H \pi^2 D^4 (2P_o + x)^2 + \frac{1}{10} (\lambda \rho_m \frac{L_t}{D}) (24Q_m (2P_o + x) + 8 \times 10^5 Q_a) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3 Вибір раціональної конструкції запірного клапану доїльного апарата

У харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості важливо відокремити текуче середовище від внутрішніх механізмів клапана, оскільки вони можуть потенційно затримувати забруднювачі. Щоб уникнути мертвих об'ємів і невеликих камер у внутрішніх механізмах клапанів, одним із рішень є використання Pinch-клапана. Pinch-клапан має внутрішній рукав, який повністю ізолює потік середовища та захищає його від забруднювачів.

Для подібних застосувань часто використовується діафрагмовий клапан. Діафрагмовий клапан має мембрану, яка притискається або всмоктується на поверхню для зупинки потоку. Він має геометричні перешкоди, але менше порушує потік, ніж соленоїдні клапани. Широкий вибір матеріалів внутрішньої трубки та мембрани робить клапан настроюваним, що дозволяє адаптувати його до різних галузей залежно від конкретних вимог. При виборі матеріалів для рукавів і мембран необхідно враховувати не тільки довговічність, але й вимоги щодо контакту з харчовими продуктами. Кожен цикл відкриття і закриття створює навантаження на матеріал, і в абразивних і корозійних умовах вони часто служать довше, ніж клапани з металевих сплавів.

Pinch-клапан із більшою площею затиску зменшить пластичну деформацію та збільшить довговічність клапана. В водоочисній і каналізаційній промисловостях Pinch-клапан обробляє кілька різних середовищ, що містять мул, пісок і сміття. Це свідчить про те, що при правильних розмірах і матеріалі рукава клапан зможе обробляти грудки в молоці. Це головним чином через гладку поверхню без перешкоджаючих кишень. Обидва клапани можуть бути пропорційно відкриті або закриті, що дає змогу краще контролювати потік через клапани. Клапани можуть керуватися як пневматично, так і механічно.

У автомобільній промисловості пропорційні клапани використовуються для керування подачею повітря до автомобілів. Зазвичай клапани керуються за

допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM). У схожому застосуванні Pinch-клапан використовувався для регулювання тиску повітря в клапані розпилювача. Клапан розпилювача використовувався в системі поливу сільськогосподарських культур. Система була змодельована як лінійна система і спочатку контролювалася за допомогою зниженої моделі спостерігача. Однак контролер досягнув кращої керованості з пропорційно-інтегральним контролером. Дослідження показують, що Pinch-клапан може бути життєздатною альтернативою для використання в системі доїння.

Клапан відсічення, який наразі використовується компанією DeLaval, є мембранним клапаном, який механічно саморегулюється, відкриваючись і закриваючись залежно від різниці між контрольним вакуумом і вакуумом у молочній трубці. Нижче наведено деякі альтернативи клапанів.

Вентильні клапани працюють шляхом підняття пробки з потоку. Коли вентильний клапан відкривається, він дозволяє текучому середовищу проходити. Хоча вони мають переваги в керуванні та точності, є деякі проблеми з цим рішенням. Мертві об'єми розташовані як на дні каналу, так і в зазорі між керуючим стрижнем і стінкою. Через це його важко очистити після використання, і він не відповідає нормам щодо контакту з харчовими продуктами.

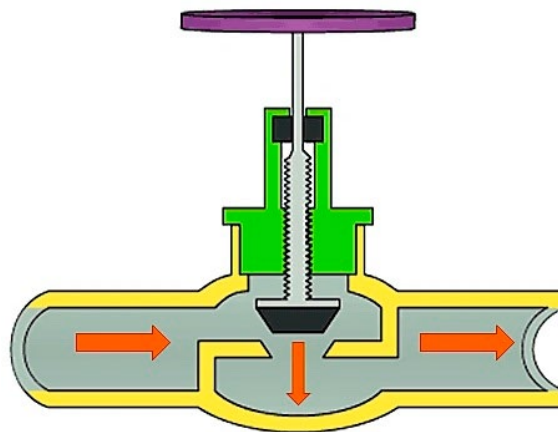


Рисунок 2.2 – Вентильний клапан

Соленоїдний привід – це електрично-керований привід. Він містить соленоїд, який є електричною котушкою з рухомим феромагнітним поршнем у центрі. У вимкненому стані поршень закриває невеликий отвір. Електричний струм через котушку створює магнітне поле. Це магнітне поле створює підйомну силу на поршень, відкриваючи отвір пропорційно введеному сигналу. Як і вентиляльний клапан, він має невеликі внутрішні частини, де можуть накопичуватися забруднювачі, що не відповідає вимогам щодо контакту з харчовими продуктами.

Pinch-клапани (перетискний клапан) зазвичай керуються механічно, але є варіанти, де клапан керується пневматично. Він використовує стиснене повітря для відкриття та закриття клапана. У відкритому положенні клапан не має геометричних обмежень і дозволяє широкому діапазону середовищ проходити через клапан. Гнучкий внутрішній рукав, виготовлений із харчового каучуку, ізолює середовище, запобігаючи будь-якому ризику забруднення та полегшуючи очищення.

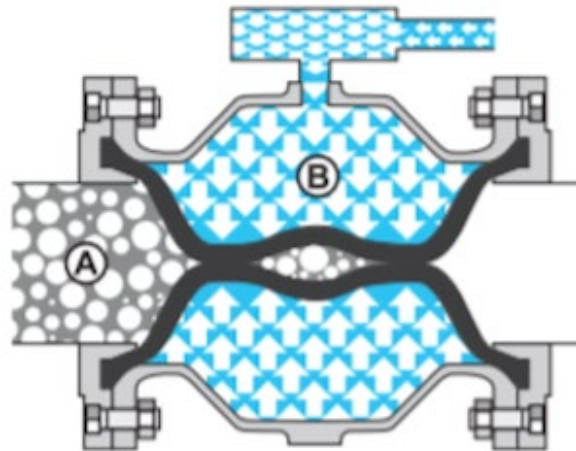
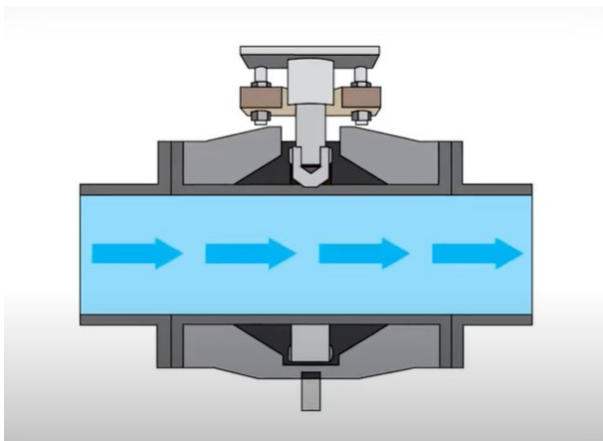


Рисунок 2.3 – Пневматичний Pinch-клапан (перетискний клапан)

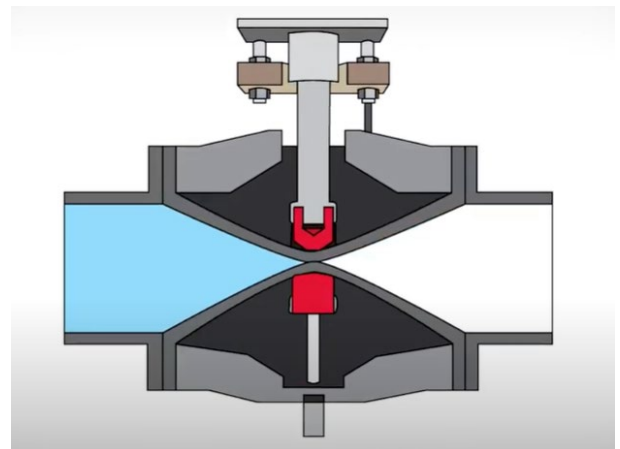
Діафрагма клапана є гнучкою частиною, що реагує на тиск. Ця частина створює силу для регулювання, закриття або відкриття клапана. Цей тип клапана дуже схожий на Pinch-клапан, але використовує еластичну мембрану замість гнучкого рукава для ізоляції рідини від закриваючої частини. Клапан може керуватися як пневматично, так і механічно.

Запропонована концепція дизайну повинна вирішувати проблеми в існуючих системах доїння компанії DeLaval. Нова концепція повинна бути розроблена для усунення вакуумного падіння в колекторі, враховуючи вимоги, наведені в розділі 1.

Концепція дизайну 1 – Pinch-клапан. Функціональність Pinch-клапана можна побачити на рисунку 2.4, де (а) показує Pinch-клапан у відкритому стані, а (б) – у закритому. Pinch-клапани зазвичай використовуються для в'язких і грудкуватих рідин, тому можуть не працювати так, як очікується, з молоком як робочим середовищем. Однак Pinch-клапани широко застосовуються в харчовій промисловості.



а – привід відпущений, клапан відкритий



б – активований привід, клапан закритий

Рисунок 2.4 – Механізм перетискного клапана (Pinch-клапан)

Як показано на рисунку 2.4, лише сам рукав контактує з робочим середовищем, що дозволяє уникнути багатьох потенційних проблем із регулюванням контактів із харчовими продуктами. Ще однією перевагою цього рішення є те, що тиск через клапан є низьким через відсутність геометричних обмежень, коли клапан повністю відкритий.

Хоча існують комерційно доступні Pinch-клапани, якими можна керувати за допомогою вакууму або електроніки, існують певні занепокоєння щодо їх вартості. Доступні альтернативи або не мають зазначеної ціни (і тому вважаються дорогими), або просто занадто дорогі. Бюджет не було зазначено, але консенсус полягає в тому, що ціна має бути помірною. Тому, можливо, буде необхідно виготовити удосконалений Pinch-клапан, щоб одночасно мати харчові матеріали та необхідну здатність до керування, тобто використовувати пропорційний соленоїд для регулювання потоку шляхом затискання трубки.

Концепція дизайну 2 – Гібридний клапан соленоїд-діафрагма. Комерційно використовуваний на сьогоднішній день клапан у системі DeLaval є діафрагмовим клапаном. Клапан відкривається і закривається за допомогою вакуумного сигналу, який витягує мембрану від отвору, дозволяючи рідині текти через клапан. Цей сигнал є повільним і може бути важко контролювати його достатньо точно, щоб регулятор був ефективним. Ідея гібридного клапана соленоїд-діафрагма полягає в поєднанні електронно-керованого пропорційного соленоїда з уже існуючим діафрагмовим клапаном і використанні соленоїда замість вакуумного джерела для активації діафрагми, як показано на рисунку 2.5. Переваги використання соленоїда полягають головним чином у швидкості активації та точності втягування. Використання звичайного соленоїдного клапана без харчових властивостей діафрагмового клапана не підходить для цього типу застосування. Зазвичай використовувані соленоїдні клапани мають обмежені простори, в яких можуть накопичуватися пісок і бруд, і, отже, їх важче чистити. У цьому гібридному варіанті мембрана, яка відокремлює поршень соленоїда від молока, зберігає

харчові якості діафрагмового клапана, який використовується сьогодні. Основною проблемою цього дизайну є те, що поршень повинен бути прикріплений до мембрани, щоб мати можливість активувати клапан.

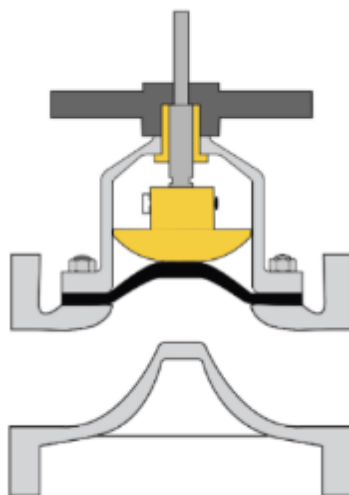


Рисунок 2.5 – Механізм гібридного клапану соленоїд-діафрагма

Ще одне можливе рішення для гібридного соленоїда/діафрагми полягає в тому, щоб використовувати соленоїд для контрольованого впуску повітря. Створивши впускний отвір у верхній частині клапана та дозволивши поршню соленоїда герметизувати/відкрити впускний отвір, можна було б контролювати потік повітря. Застосування постійного вакууму та дозволення соленоїду контролювати дію вакууму на мембрану може призвести до швидшого вмикання/вимикання клапана. Однак це рішення має таку ж двійкову характеристику активації, яку потрібно замінити пропорційною активацією, щоб досягти більш точного керування.

Розташування датчиків. Будь-яке рішення буде використовувати датчики тиску. Один із датчиків буде розташований безпосередньо під колектором, оскільки саме там необхідно регулювати вакуум. У молочній лінії буде два датчики тиску, розташовані на різній відстані від клапана. Вони створять

математичну модель того, як показання різняться в залежності від розташування датчиків. Той, який розташований якомога далі від колектора, потім буде використовуватися як вхід для системи керування.

Датчики тиску будуть встановлені в молочну лінію за допомогою модульного рішення з використанням спеціально виготовленого корпусу. Це дозволить датчикам отримати повний доступ до вимірювання рівнів вакууму, спричиняючи при цьому якомога менше порушень у системі, а також уникаючи будь-якого витоку. Щоб досягти цього, корпус буде надрукований на 3D-принтері та легко підключений до труб з обох кінців. Внутрішній діаметр буде циліндричним, щоб якомога менше впливати на потік, і в центрі буде виріз під датчик.

Щоб оцінити концепції конструкції, які обговорені, була створена матриця оцінки конструкції, в якій кожен критерій концепції зважувався та оцінювався за шкалою від 1 до 5. Це допомогло в процесі вибору, яку концепцію реалізовувати і на що робити пріоритет (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Матриця оцінки відповідності конструкції клапана вимогам

Критерії	Вага (1– 5)	Концепція (1– 5)		
		Pinch- клапан	Гібридний клапан	Базовий
Легкість впровадження	5	3	3	4
Вартість	3	2	3	5
Вартість обслуговування	3	3	4	3
Безпека харчових продуктів	5	5	3	1
Легкість керування	3	4	2	4
Легкість очищення	4	5	5	3
Можливість розширення в майбутньому	1	5	4	1
Функціональність у крайових випадках	3	3	1	3
Загальна оцінка (Вага × Концепція)		101	84	83

Загалом, найбільш придатною концепцією виявився Pinch-клапан. Він отримав найвищі оцінки за критеріями, які вважалися найбільш важливими, і тому

став основним пріоритетом проекту. Базове рішення, очевидно, не є задовільним, тому його повністю відкинули.

2.4 Аналітичні дослідження процесу роботи Pinch-клапана

Під час роботи пневматичний Pinch-клапан стискає циліндричний резиновий рукав. Це призводить до його зносу і появи тріщин. Це значною мірою пов'язано з пульсацією під час доїння, що призводить до змін у динамічному модулі Юнга. Розглянемо задачу пружного стану однорідного циліндричного рукава, який функціонує в режимі холостого ходу. У цій задачі враховуються деформації, що виникають вздовж циліндричного рукава. Поперечний переріз рукава показано на рис. 2.6.

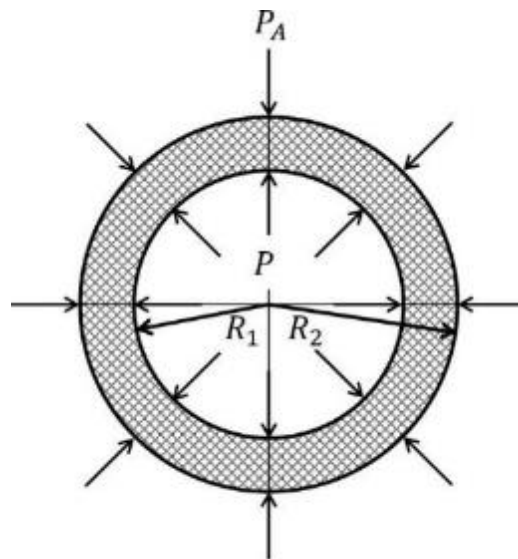


Рисунок 2.6 – Поперечний переріз рукава у пневматичному Pinch-клапані

До внутрішньої поверхні рукава $r = R_1$ прикладено постійний вакуум

$$\sigma_r|_{r=R_1} = P, \quad (2.7)$$

де R_1 – внутрішній радіус рукава, м; P – робочий вакуумметричний тиск доїльної установки, Па.

На зовнішній поверхні рукава $r = R_2$ під час стиснення виникає атмосферний тиск

$$\sigma_r|_{r=R_2} = P_A, \quad (2.8)$$

де R_2 – зовнішній радіус рукава, м; P_A – атмосферний тиск, Па.

Для розв'язання задачі розглянемо всі напруження, що діють на елементарну площу в полярних координатах, як показано на рис. 2.7.

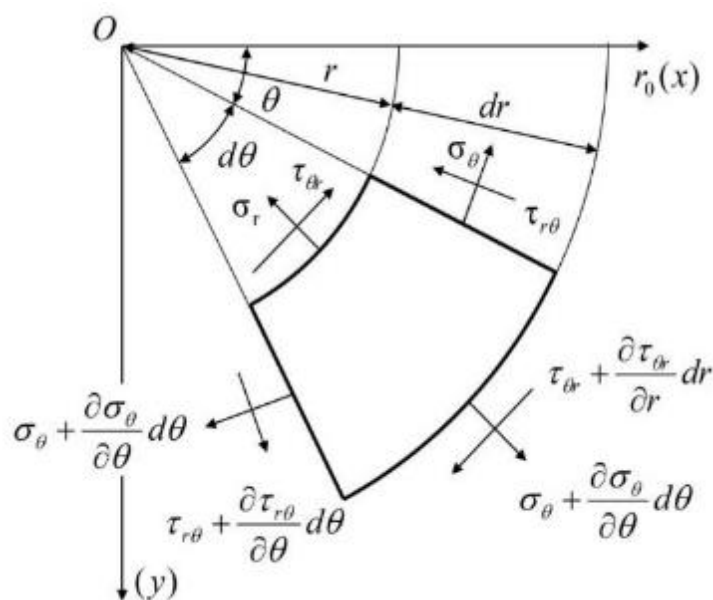


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема елементарної площі в полярній системі координат

Для рівняння рівноваги запишемо:

$$\left. \begin{aligned} & \left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta - \sigma_r r d\theta - \left(\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} d\theta \right) dr \sin \frac{d\theta}{2} - \\ & - \sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} + \left(\tau_{r\theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} d\theta \right) dr \cos \frac{d\theta}{2} - \tau_{r\theta} dr \cos \frac{d\theta}{2} = 0; \\ & \left(\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} d\theta \right) dr \cos \frac{d\theta}{2} - \sigma_\theta dr \cos \frac{d\theta}{2} + \left(\tau_{\theta r} + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta - \\ & - \tau_{\theta r} r d\theta + \left(\tau_{r\theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} d\theta \right) dr \sin \frac{d\theta}{2} = 0. \end{aligned} \right\}, \quad (2.9)$$

де σ_r, σ_θ – нормальні напруженості; r, θ – полярні координати; τ_r, τ_θ – дотичні напруженості.

Припустимо, що система має осьову симетрію, тобто кутове зміщення відсутнє, а радіальна компонента u залежить лише від радіуса r і часу t . З урахуванням цього система рівнянь (2.9) набирає наступного вигляду:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \\ & \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0. \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}. \quad (2.10)$$

Поставлена задача підпорядковується закону Гука, який має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] / E, \\ \varepsilon_\theta = [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] / E, \\ \varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] / E, \end{cases} \quad (2.11)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності Юнга, кПа; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – відносні деформації.

З приведених рівнянь (2.11) отримуємо σ_r та σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{E}{2\nu^2 + \nu - 1} [\varepsilon_\theta (\nu - 1) - (\varepsilon_r + \varepsilon_z) \nu], \quad (2.12)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{2\nu^2 + \nu - 1} [\varepsilon_r (\nu - 1) - (\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \nu]. \quad (2.13)$$

Для деформацій справедливе таке рівняння:

$$\varepsilon_\theta = \frac{u(r)}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{du(r)}{dr}. \quad (2.14)$$

Підставивши (2.11)-(2.13) у (2.14), отримаємо диференціальне рівняння другого роду:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0. \quad (2.15)$$

Рішенням рівняння (2.15) є $u = Ar + \frac{B}{r}$. Підставляючи отримані розв'язки в

(2.14) і (2.12), отримаємо:

$$\sigma_\theta = \frac{E}{2\nu^2 + \nu - 1} \left[\left(A + \frac{B}{r^2} \right) (\nu - 1) - \left(\left(A - \frac{B}{r^2} \right) + \varepsilon_z \right) \nu \right], \quad (2.16)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{2\nu^2 + \nu - 1} \left[\left(A - \frac{B}{r^2} \right) (\nu - 1) - \left(\left(A + \frac{B}{r^2} \right) + \varepsilon_z \right) \nu \right], \quad (2.17)$$

де A, B – сталі інтегрування.

Враховуючи граничні умови (2.16) та (2.17), отримано наступні інтегральні коефіцієнти:

$$B = \frac{1 + \nu}{E} \frac{R_1^2 R_2^2 (P - P_A)}{R_1^2 - R_2^2}, \quad (2.18)$$

$$A = \frac{2\nu^2 + \nu - 1}{E} \frac{R_2^2 P_A - R_1^2 P}{R_1^2 - R_2^2} - \nu \varepsilon_z. \quad (2.19)$$

Підставивши рівняння (2.52) і (2.53) в рівняння (2.52) і (2.53), отримаємо напругу:

$$\sigma_\theta = \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (P_A - P)}{R_1^2 - R_2^2} \frac{1}{r^2}, \quad (2.20)$$

$$\sigma_r = \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (P_A - P)}{R_1^2 - R_2^2} \frac{1}{r^2}, \quad (2.21)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) + E\varepsilon_z = 2\nu \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} + E\varepsilon_z. \quad (2.22)$$

Дані про старіння гуми можна апроксимувати експоненціальною залежністю

динамічного модуля Юнга:

$$E(t) = E_{\text{дн}} + (E_{\text{дк}} - E_{\text{дн}})e^{kt}. \quad (2.23)$$

де k – константа швидкості зносу гуми, с^{-1} ; $E_{\text{дн}}$ і $E_{\text{дк}}$ – початкове і кінцеве значення динамічного модуля, Па.

Сила натягу рукава $F_{\text{н}} = \sigma_r S = \frac{\pi \sigma_r}{2} (R_2^2 - R_1^2)$, і підставляючи (2.23) у (2.22),

маємо:

$$F_{\text{н}} = \pi v (P R_1^2 - P_A R_2^2) - \frac{\pi \varepsilon_z}{2} (R_2^2 - R_1^2) (E_{\text{дн}} + (E_{\text{дк}} - E_{\text{дн}})e^{kt}). \quad (2.24)$$

За експериментальними даними та конструктивними параметрами гумового рукава було отримано графік залежності зусилля його розтягування від часу напрацювання (рис. 2.8).

З огляду на вимоги (зусилля розтягування гуми повинно становити 50-70 Н) і рис. 2.8 теоретичний термін служби гуми рукава становить приблизно 160 годин, що підтверджується технічною документацією. Враховуючи двократне доїння по 2 години, то рукав слід міняти кожні 40 днів експлуатації доїльної установки.

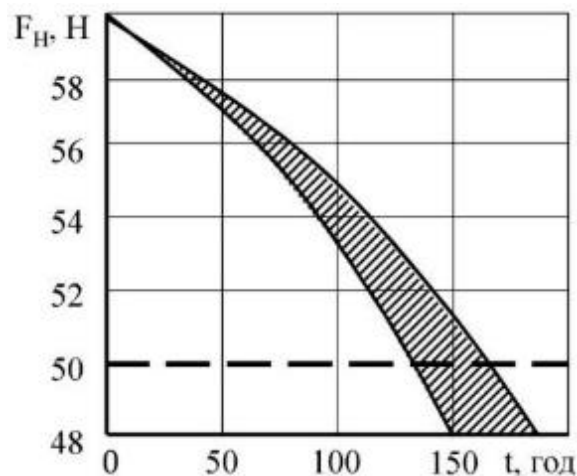


Рисунок 2.8 – Графік залежності сили натягу рукава у пневматичному Pinch-клапані від тривалості його експлуатації

2.5 Висновки з розділу

1. Поточна конструкція доїльного апарата DeLaval включає молочний колектор, молокомір, пульсатор і пневматичний діафрагмовий клапан. Молочний колектор підключається до дійок корови, забезпечуючи стабільний вакуум протягом доїння, що є критичним для ефективності процесу. Проблеми, що виникають з механічним клапаном відсічення, включають труднощі з регулюванням і самоколиванням, що негативно впливає на стабільність вакууму.

2. Аналіз вакуумного падіння в молочній трубці показує, що вакуумне падіння залежить від кількох факторів, таких як об'ємний повітряний коефіцієнт, густина молока, довжина та діаметр трубки, швидкість потоку і коефіцієнти втрат. Падіння вакууму зростає зі збільшенням швидкості потоку, і його значення завжди буде ненульовим, незалежно від конструкції системи доїння.

3. Вибір конструкції клапана залежить від його здатності уникати забруднень і підтримувати точність регулювання потоку. Pinch-клапани, діафрагмові клапани та вентильні клапани мають свої переваги і недоліки. Pinch-клапани, завдяки своїй конструкції, добре підходять для харчових застосувань, де важливо уникати мертвих об'ємів і забруднень.

4. Під час роботи пневматичного Pinch-клапана важливо враховувати знос гумового рукава через пульсацію. Розрахунки показують, що термін служби гуми рукава є приблизно 160 годин, що відповідає технічній документації. З урахуванням умов експлуатації, рукав слід замінювати кожні 40 днів при регулярному використанні.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Лабораторний стенд для проведення дослідження

Лабораторний стенд було побудовано для імітації умов доїння та перевірки ефективності нового вакуумно-регульованого клапана. Лабораторний стенд мав на меті відтворити систему доїння, що використовується компанією DeLaval, з можливістю легкої інтеграції нових компонентів для тестування. Лабораторний стенд складався з трьох основних частин: вакуумної системи, молочної лінії та системи збору даних.

Вакуум в системі створювався вакуумним насосом, який був підключений до основної вакуумної лінії. Щоб підвищити стабільність рівня вакууму в системі, до вакуумної лінії підключили вакуумний балон. Аналоговий манометр використовувався для зчитування рівня вакууму, щоб легше відкалібрувати вакуумний насос для досягнення бажаного рівня вакууму в системі. Пульсатор, який генерував стискаючий рух дійкової гуми, був підключений до вакуумної лінії. Кінець молокопроводу також був підключений до вакуумної лінії через молокозбірник, який створював вакуум у молочних трубках.

Вода, яка замінила молоко, подавалася в систему з крана, який повертався вручну для регулювання витрати. Вода була розділена на чотири доїльні стакани на колекторі. Безпосередньо під колектором був розміщений датчик тиску для вимірювання всмоктування в колекторі. Тоді вода протікала через датчик потоку та лічильник молока.

Безпосередньо перед інвертованим перетискним клапаном був розміщений датчик тиску, який використовувався як еталон для контролера. Перевернутий Pinch-клапан був оснащений датчиком тиску для вимірювання внутрішнього тиску в камері. Вакуум всередині камери створювався додатковим вакуумним насосом і

регулювався електронним способом за допомогою пропорційного клапана. Після клапана вода текла через молокопровід і потрапляла у молокозбірник.

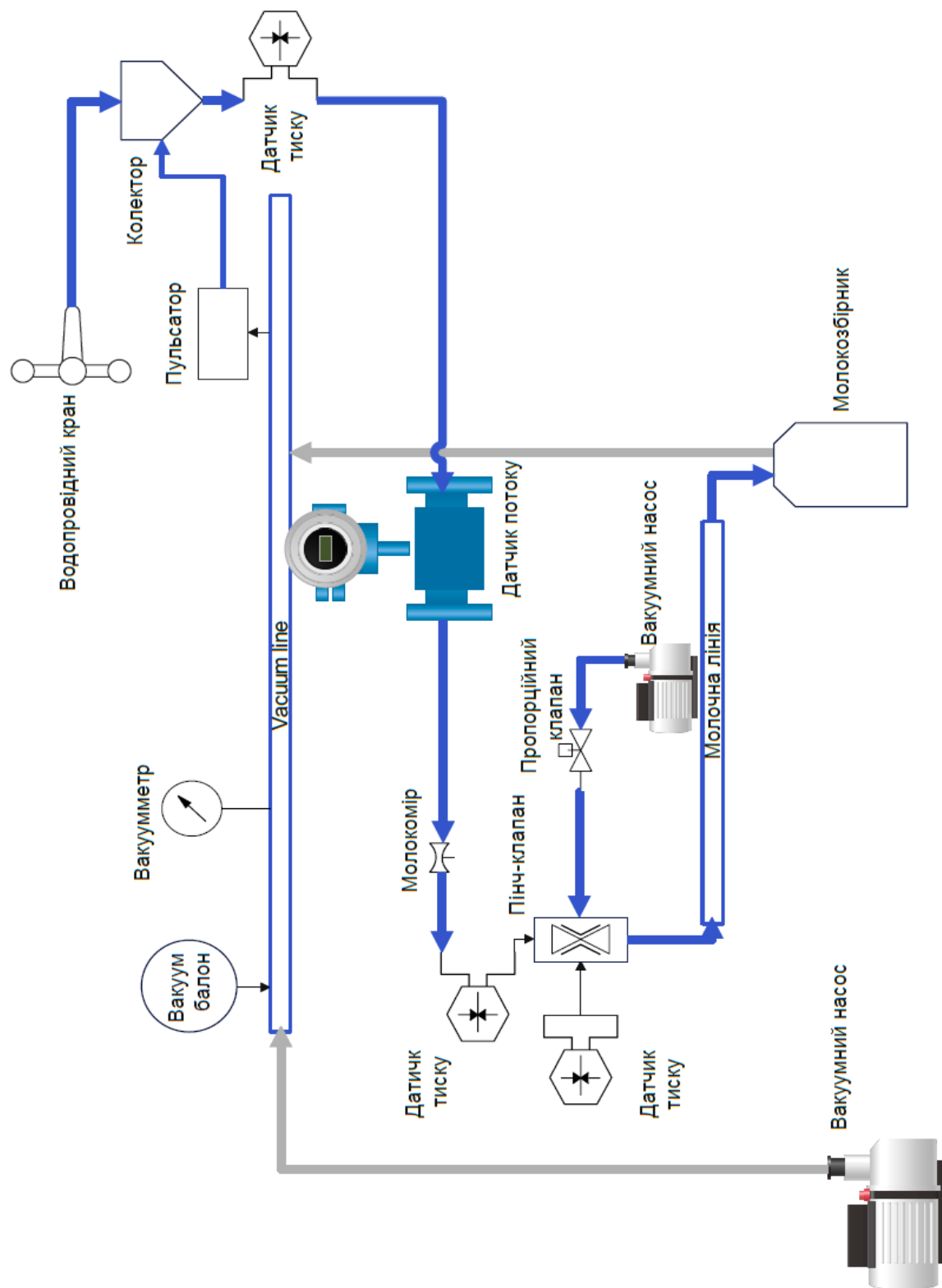


Рисунок 3.1 – Блок-схема лабораторного стану для проведення дослідження

Розділювач молока. Щоб забезпечити рівномірну подачу води до всіх чотирьох доїльних стаканів, був спроектований і надрукований на 3D-принтері водяний розділювач. Шланг розподільника під'єднується до водопровідного крана і з'єднаний із верхнім входом за допомогою хомута. Чотири дійкові чашки потім під'єднувалися кожна коротким шматком трубки. Конструкцію в CAD представлена на рис. 3.2.

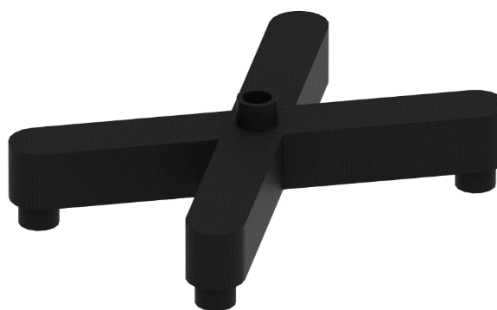


Рисунок 3.2 – Конструкція молокороздільника

Витратомір води. Для вимірювання витрати води в системі та встановлення зв'язку між витратою і падінням вакууму використовувався витратомір води. Було обрано вбудовану модель витратоміра, яка включає з'єднувачі до вхідних і вихідних труб. Витрата води пізніше використовувалась для оцінки тиску в колекторі в поєднанні з датчиком тиску, розміщеним безпосередньо перед Pinch-клапаном.

Джерело вакууму. Було використано два вакуумні насоси. Один був використаний як джерело вакууму для системи та був налаштований на 55 кПа у відповідності до SR 3. Інший вакуумний насос використовувався для створення вакууму в камері Pinch-клапана.

Пропорційний клапан. Для керування рівнем вакууму всередині камери Pinch-клапан до певного рівня використовувався пропорційний клапан з керуванням за допомогою ШІМ. Це дозволяло змінювати рівень вакууму

пропорційно до прикладеного сигналу ШІМ з напругою 24 В. Вихід був безпосередньо під'єднаний до камери інвертованого затискача. Зображення пропорційного клапана представлено на рис. 3.3.

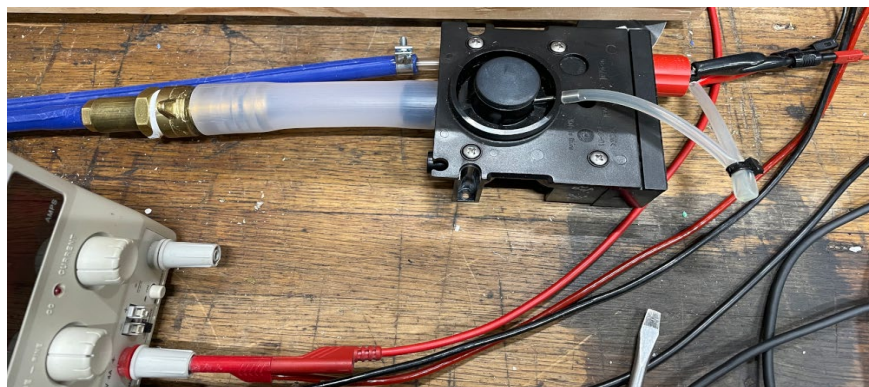


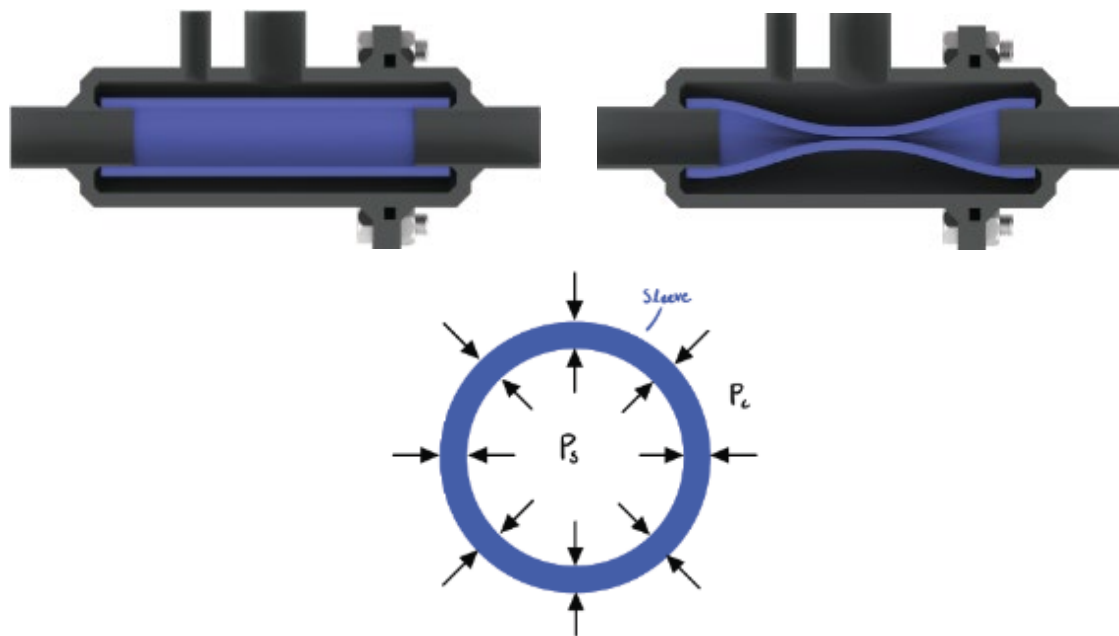
Рисунок 3.3 – Пропорційний клапан, який використовується для регулювання розрідження в камері Pinch-клапана

3.2 Розробка Pinch-клапана

Всі компоненти, виготовлені командою, були зроблені з пластику PLA за допомогою 3D-принтера. Розмір сопла становив 0,8 мм, висота шару була встановлена на 0,2 мм, щільність заповнення була 100 відсотків з сітчастим візерунком, швидкість друку була встановлена на 60, за винятком швидкості першого шару, яка була встановлена на 30. Для підтримки було використано кут у 80 градусів, а також був застосований параметр «brim». Температура сопла та платформи для друку повинна бути встановлена відповідно до інструкцій на катушці з PLA-матеріалом. Температурні налаштування, використані для друку цього проєкту, були 220 градусів Цельсія для сопла і 60 градусів Цельсія для платформи.

Pinch-клапан. Щоб вирішити проблему керування клапаном у спосіб, безпечний для харчових продуктів, без складної внутрішньої геометрії, було

вирішено, що найбільш підходящим буде використання затискача. Звичайний затискач, що використовується в системах високого тиску, не працюватиме в системі низького тиску через його поведінку. Проте, з кількома змінами, такий клапан може бути застосований у системі низького тиску. У системі низького тиску рукав буде закритий за замовчуванням (рис. 3.4, b).



- a – поперечний розріз Pinch-клапана, коли до камери подається вакуум;
 b – поперечний переріз Pinch-клапана, коли в камері немає вакууму; c – ілюстрація різниці тиску всередині та зовні рукава

Рисунок 3.4 – Принцип роботи розробленого Pinch-клапана

Різниця тиску між внутрішньою та зовнішньою частинами рукава призводить до його складання, коли $P_s < P_c$, перекриває потік (рис. 3.4, c). Оскільки камера за замовчуванням має атмосферний тиск, а у рукаві тиск нижчий, рукав зазвичай закритий. Протилежне стосується клапана, призначеного для систем високого тиску, де використовується механізм, який чинить тиск на зовнішню частину рукава, щоб перекрити потік. Щоб це працювало в системі

низького тиску, було використано вакуумний насос для зниження тиску в камері, що призводить до зворотного ефекту. Іншими словами, це відкриває рукав, збільшуючи потік, оскільки $P_s > P_c$ (рис. 3.4, а).

Остаточний дизайн Pinch-клапана можна побачити на рис. 3.5, а. Камера була виготовлена з пластику PLA за допомогою 3D-принтера. Вона складається з двох частин, затиснутих разом за допомогою ущільнювального кільця (O-ring) і чотирьох болтів і гайок М6 (рис. 3.5, б).

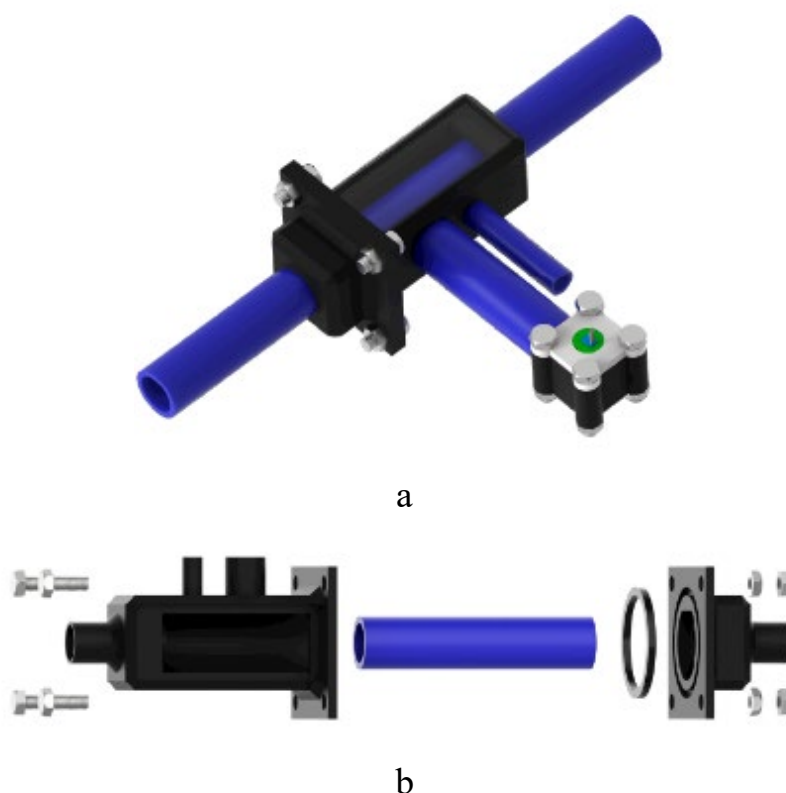


Рисунок 3.5 – Зібрана CAD-проект перевернутого Pinch-клапана

Камера має чотири входи/виходи. Молоко надходить з молочної лінії в клапан з лівого боку, проходить через тонкий рукав і виходить з правого боку. Менший вхід зверху з'єднаний тонкою трубкою з вакуумним насосом через пропорційний клапан. Більший вихід зверху призначений для підключення датчика тиску для зчитування поточного тиску в камері. Зовнішній діаметр

з'єднувальних труб для молочної лінії та рукава такий самий, як внутрішній діаметр рукава, що забезпечує досить щільне ущільнення. Проте рукав також був приклеєний епоксидною смолою для забезпечення надійного ущільнення.

Загальний вигляд створеного лабораторного стенду наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 – Загальний вигляд лабораторного стенду

3.3 Датчики і система керування

Для того щоб датчики тиску були правильно інтегровані в систему, було розроблено корпус відповідно до концепції, обговореної в розділі 2. Він

ілюструється на рис. 3.7, а. Поперечний переріз, показаний на рис. 3.7, б, детальніше описує кріплення датчика до корпусу. Датчик розміщується на ущільнювальному кільці (O-ring) і притискається верхньою кришкою, яка, у свою чергу, закріплюється на конструкції за допомогою чотирьох болтів і гайок М6. Внутрішній діаметр проходу було обрано таким самим, як і у з'єднувальних труб, щоб забезпечити більш однорідний перехід від трубки до датчика. Розгорнута схема показана на рис. 3.7, с.

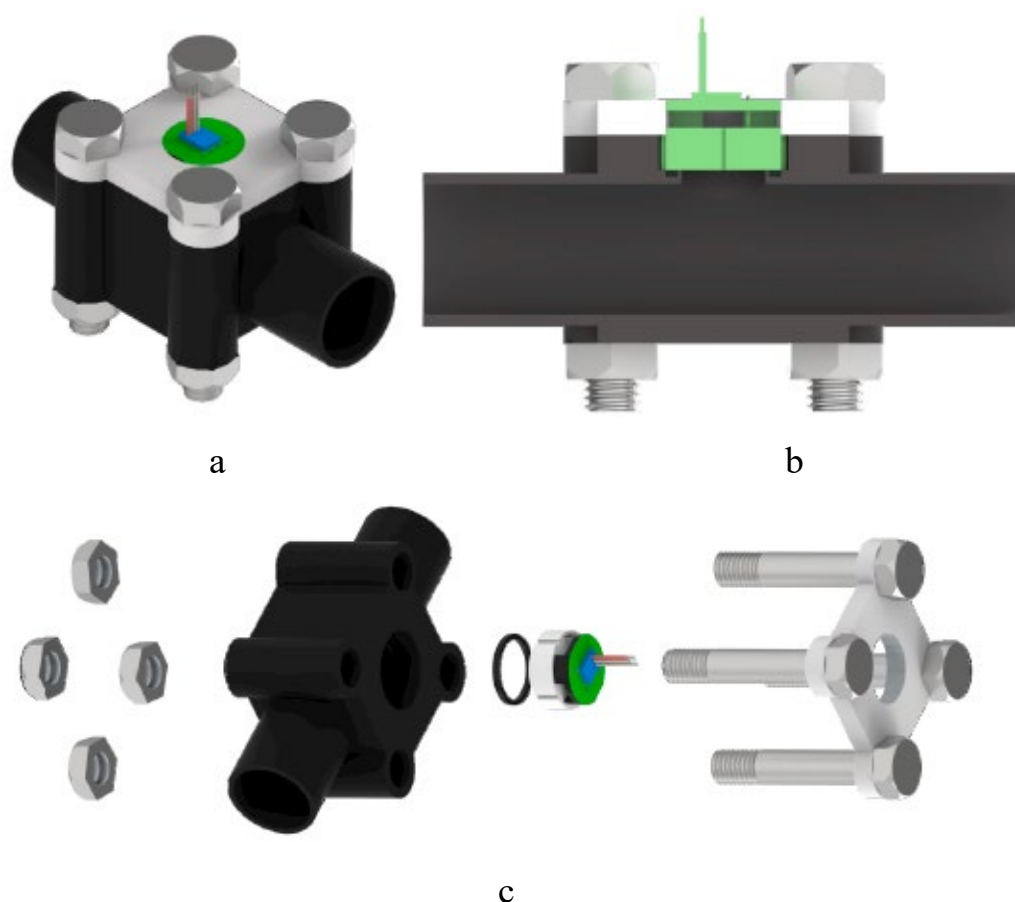


Рисунок 3.7 – Зібраний CAD-проект корпусу датчика

Вимога TR5 зазначає, що конструкція повинна бути досить міцною, щоб витримувати суворі умови. Це робить більш доцільним розробку системи таким чином, щоб датчик у колекторі не був необхідним. Причина цього полягає в тому,

що пряме вимірювання в колекторі не є надійним рішенням через його близькість до корови. Тому запропонована реалізація використовувала датчик у колекторі лише для валідації, а не для контролю, і не повинна використовуватися в комерційних застосуваннях. Натомість контрольний датчик був розміщений далі по молочних трубах від корови, після витратоміра, але перед Pinch-клапаном. Його розмістили перед клапаном, щоб мінімізувати вплив перешкод на тиск у точці вимірювання, що робить його більш схожим на тиск у колекторі.

Для оцінки стану вакууму в колекторі на основі вимірювання ближче до кінця труби використовувалася функція, яка передбачає внутрішнє падіння вакууму, у поєднанні з фільтром Кальмана. Виведення рівнянь для доїльної системи було б складним, оскільки вона містить двофазний перехідний потік і багато гнучких компонентів. Натомість взаємозв'язок між падінням вакууму і витратою води був лінійно підібраний, щоб запропонувати простий метод оцінки.

Коли для вимірювання умов у контрольованому процесі доступні кілька датчиків, каскадна система управління може часто працювати краще, ніж традиційний контролер з одним вимірюванням. Система складається з первинного та вторинного контролера. Первинний або головний контролер генерує керуючий вплив, який слугує завданням для вторинного або підпорядкованого контролера. Той, у свою чергу, використовує виконавчий механізм для прямого застосування свого керуючого впливу до вторинного процесу. Вторинний процес потім генерує вторинну змінну процесу, яка слугує керуючим впливом для первинного процесу.

Як показано на рис. 3.8, обидва контури використовують PID-регулятори.

Внутрішній контур керує тиском у камері інвертованого затискача, який використовується як керуючий вплив для тиску у внутрішньому рукаві. Він генерує ШІМ-сигнал для керування електромагнітним пропорційним клапаном. Зовнішній контур включає внутрішній контур, інвертований затискач, фільтр Кальмана та блок лінійної апроксимації. Він передає показники кінцевого датчика

через фільтр Кальмана та блоки апроксимації, функції яких описані вище, щоб оцінити поточний стан тиску в колекторі.

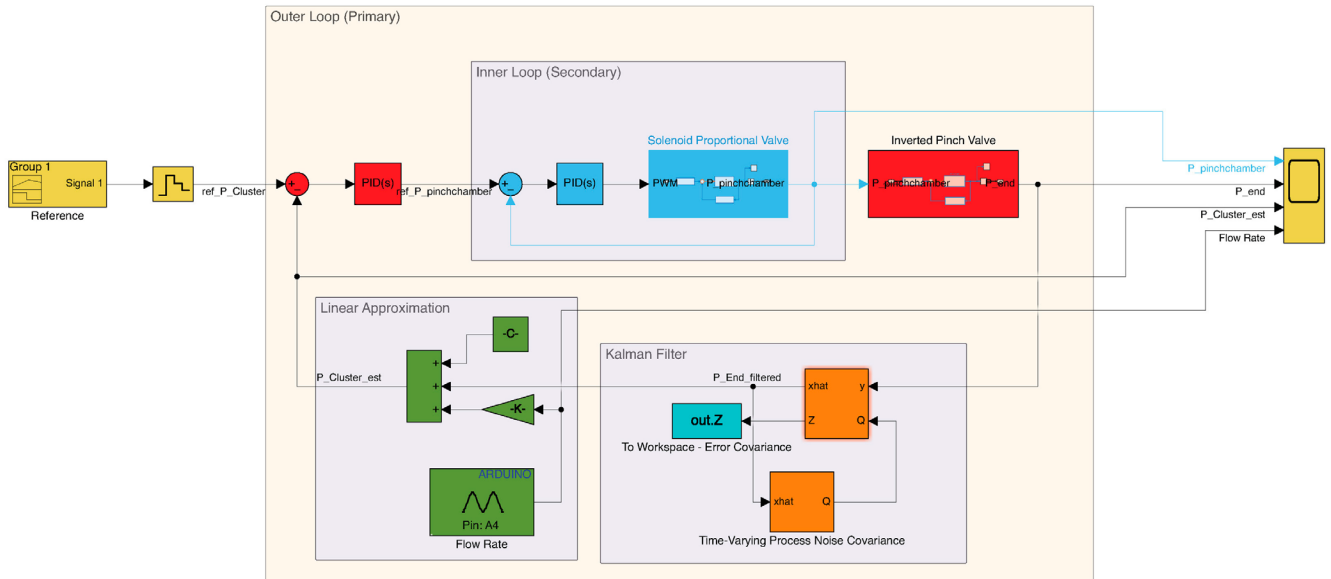


Рисунок 3.8 – Блок схема каскадної системи управління

Були розроблені та впроваджені дві програми: одна в Arduino для керування клапаном і інша в MATLAB для зчитування та побудови графіків даних датчиків у режимі реального часу.

Для пропорційного клапана була створена драйверна схема, яка дозволяє керувати ним за допомогою PWM-сигналу від мікроконтролера. Схема всіх електронних компонентів наведена на рис. 3.9.

3.4 Верифікація

Було проведено кілька тестів, щоб визначити обмеження лабораторної установки, а також перевірити, чи є вона відповідним представленням доїльної системи. Насамперед було протестовано поточне рішення клапана від DeLaval з точки зору падіння тиску через сам клапан і падіння вакууму в колекторі в

результаті різних витрат. Зібрані дані потім були порівняні з даними, зібраними DeLaval на їх тестовій установці. Після цього інвертований затискач був підданий тим самим типам тестів.

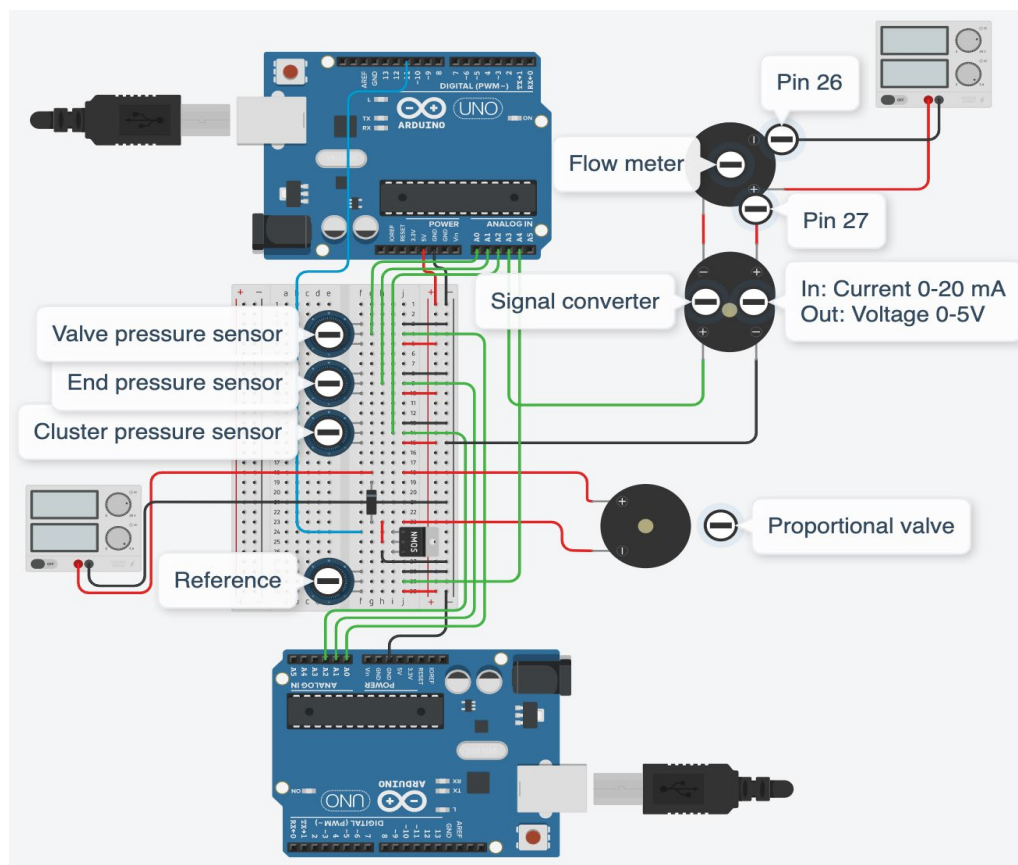


Рисунок 3.9 – Електрична схема системи керування

Були проведені такі тести інвертованого затискача: падіння тиску через сам клапан без будь-якого керування при повністю відкритому клапані, падіння тиску в колекторі без будь-якого керування при повністю відкритому клапані, падіння тиску в колекторі з керуванням при постійному та змінному завданні, і, нарешті, тестування граничного випадку зісковзування дійки. Зазначимо, що під час тестування поточного рішення клапана від DeLaval, інвертований затискач був просто знятий і замінений на поточний клапан, без внесення інших змін у систему.

4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Попередні результати

У цьому розділі задокументовано та представлено всі результати тестів. Це включає експерименти, проведені для перевірки та підтвердження функціонування блоків та всієї системи.

Параметри PID контролера для внутрішнього та зовнішнього контурів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри PID контролера

Контур	K_P	K_I	K_D
Внутрішній	0,25	$1 \cdot 10^{-11}$	10
Зовнішній	0,15	$2 \cdot 10^{-11}$	11

Наступні тести були проведені з використанням базового клапана DeLaval. Для цього тесту датчик тиску був розташований перед та після поточного клапана DeLaval. Результати наведені в табл. 4.2 та на рис. 4.1.

Таблиця 4.2 – Падіння вакууму через поточний клапан. Середнє падіння вакууму для різних швидкостей потоку з мінімальними та максимальними значеннями

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	1,2	2,6	– 0,7
55	10–14	1,9	3,6	0

Контролер був побудований з використанням мікроконтролера Arduino, що означає, що коефіцієнт пропорційності (K_P) був фіксованим. Однак коефіцієнти інтеграції (K_I) і диференціювання (K_D) були залежні від часу вибірки (T_s).

Коефіцієнт K_I був розрахований як K_I , помножений на T_s , а коефіцієнт K_D був розрахований як K_D , поділений на T_s . Значення для I (коефіцієнта інтеграції) і D (коефіцієнта диференціювання) є динамічними параметрами, які залежать від часу вибірки T_s . Для демонстрації роботи PID контролерів було обрано типовий час вибірки $T_s = 1$ мс, щоб перевірити реакцію на крокову функцію внутрішнього і зовнішнього контуру контролера.

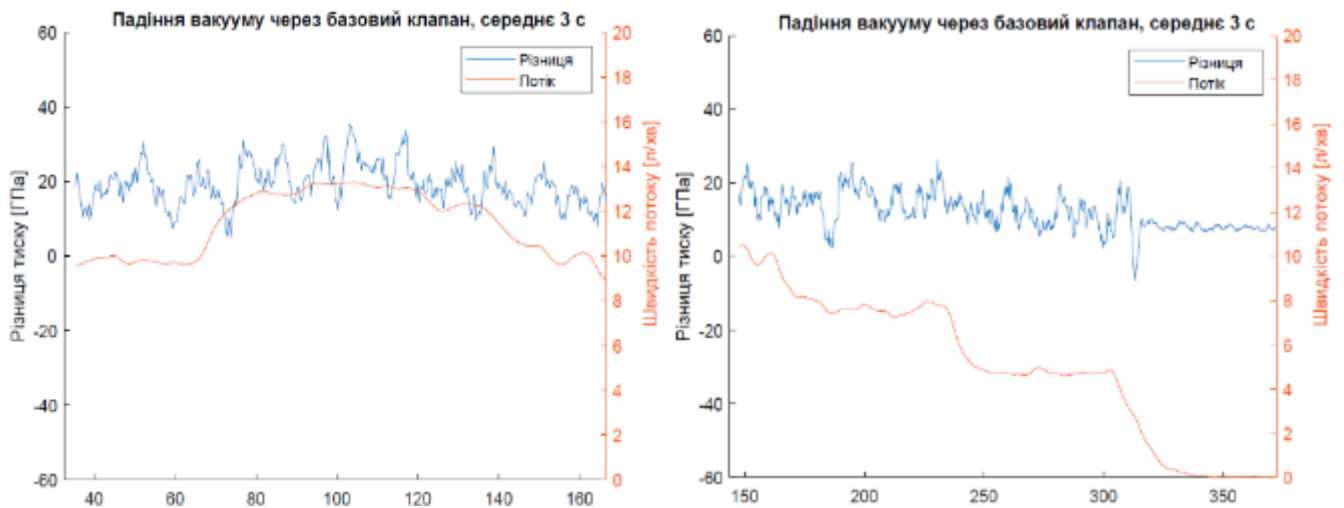


Рисунок 4.1 – Падіння тиску над базовим клапаном DeLaval для інтервалів витрати 0–10 л/хв (b) та 10–14 л/хв (a)

Для того, щоб дослідити залежність між падінням вакууму та швидкістю потоку, були проведені тести, де швидкість потоку виступала в ролі крокового вхідного сигналу, в той час як інверсний клапан був повністю відкритий. Швидкість потоку збільшувалася поступово та підтримувалася постійною, доки вакуум не досягав сталого стану для кожного кроку, як показано на рис. 4.2.

Різниця між показаннями датчиків стосовно швидкості потоку була записана і відображена на графіку для побудови лінійної кривої. Отриманий графік показано на рис. 4.3, а лінійне рівняння має вигляд $\Delta P = 5,15 f + 2,76$, де f — це швидкість потоку.

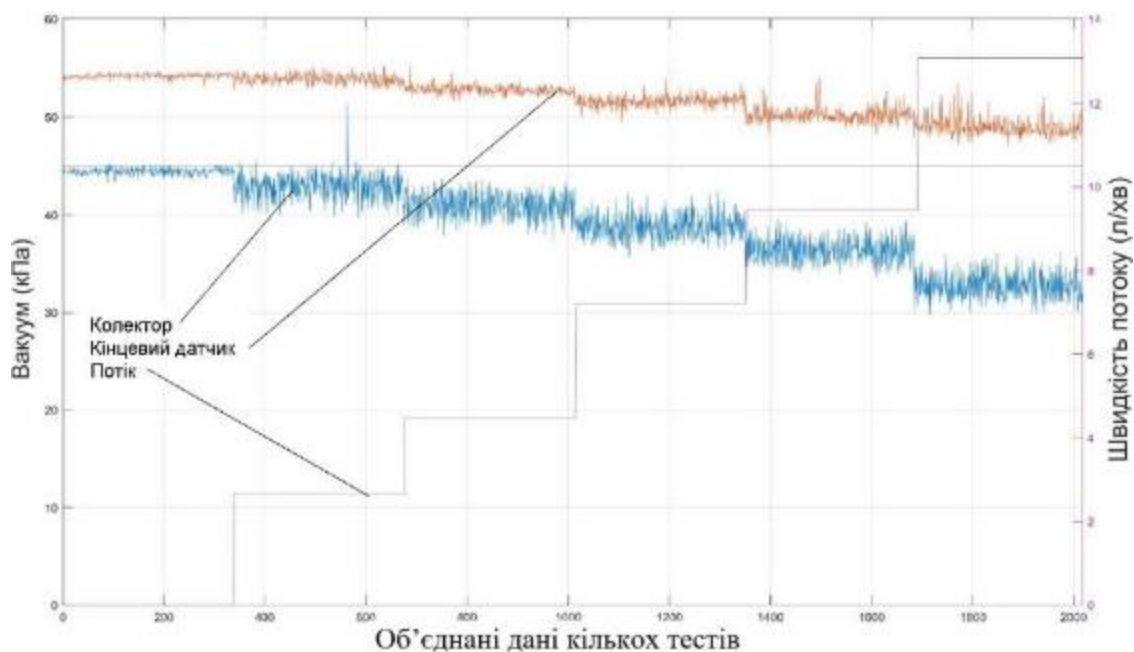


Рисунок 4.2 – Об'єднані дані кількох тестів

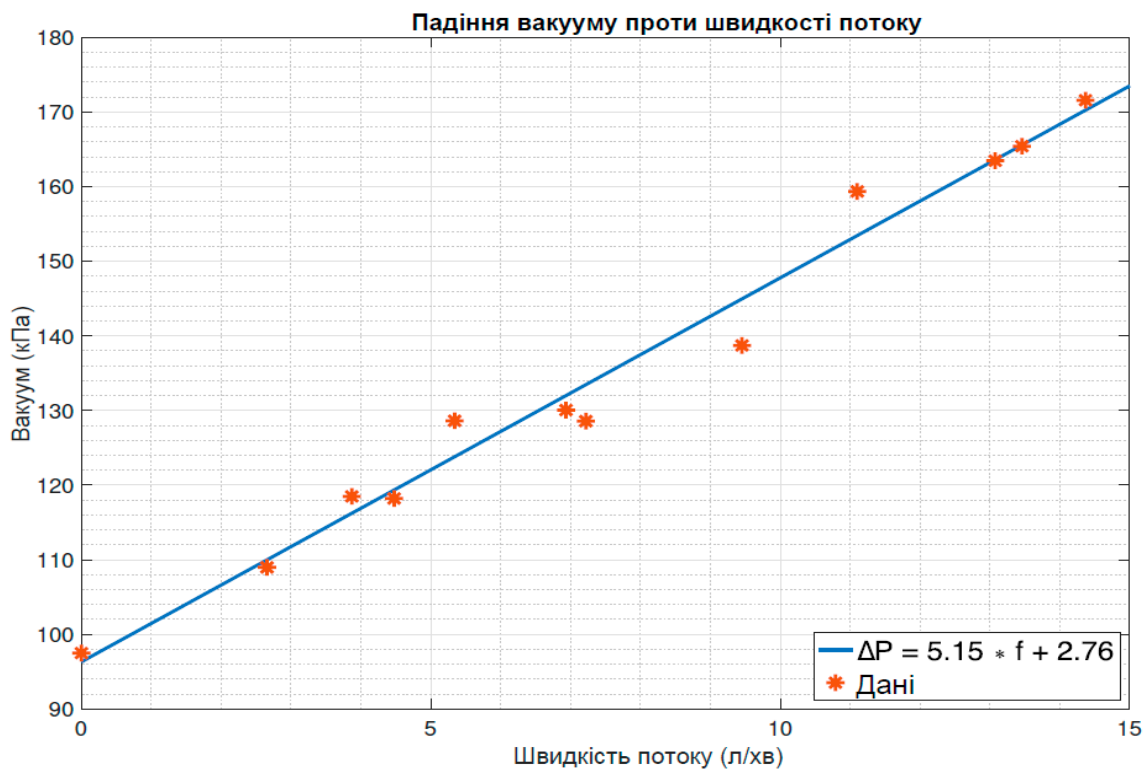


Рисунок 4.3 –Лінійна апроксимація даних тестування для різниці вакууму між датчиками колектору і контролера з повністю відкритим Pinch-клапаном

4.2 Результати досліджень Pinch-клапану

У цьому розділі розглянуто результати роботи Pinch-клапану. На наступних рисунках "Pinch" стосується рівня вакууму в камері інверсного клапана затиску, "Контрольний датчик" стосується рівня вакууму безпосередньо перед клапаном, а "Колектор" стосується рівня вакууму в колекторі. Усі дані на графіках відображені з трисекундним рухомим середнім.

У цьому дослідженні Pinch-клапан був повністю відкритий, і контроль не використовувався.

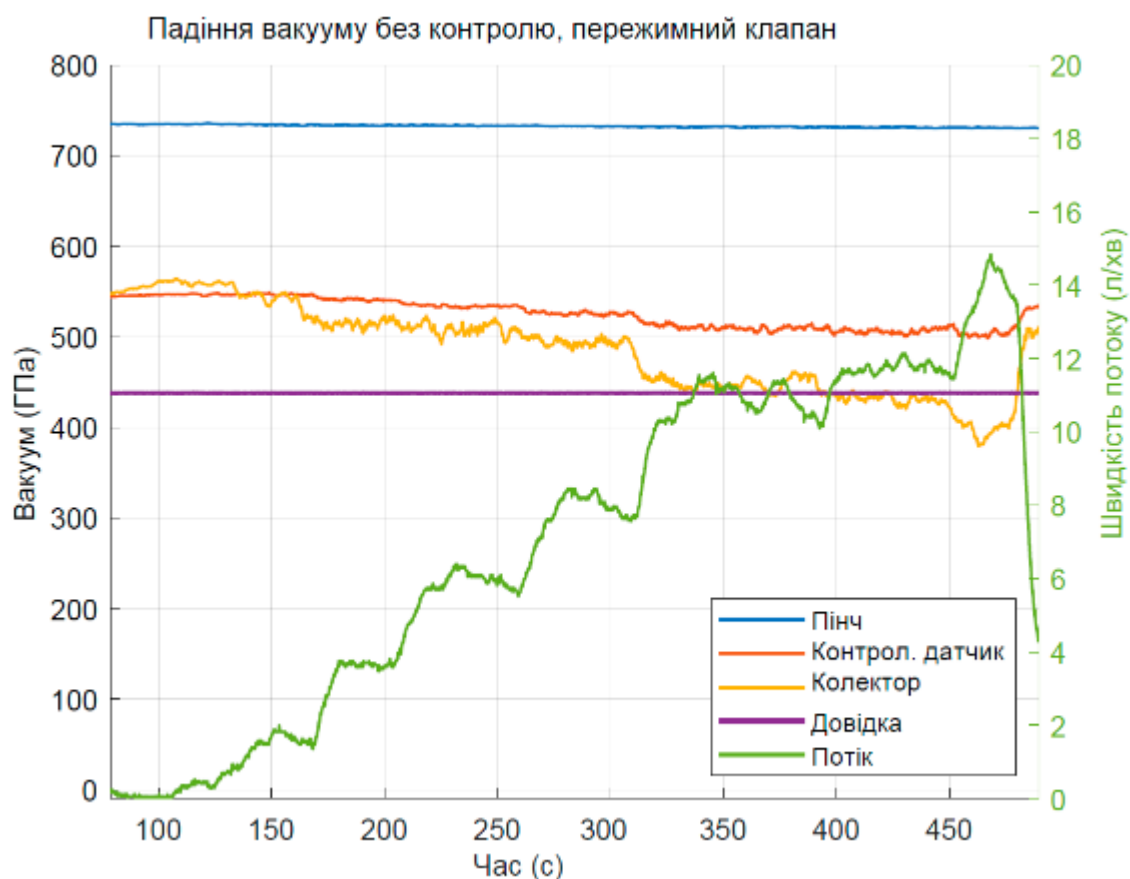


Рисунок 5.4 – Рівень вакууму в колекторі для різних витрат без контролю. Pinch-клапан повністю відкритий

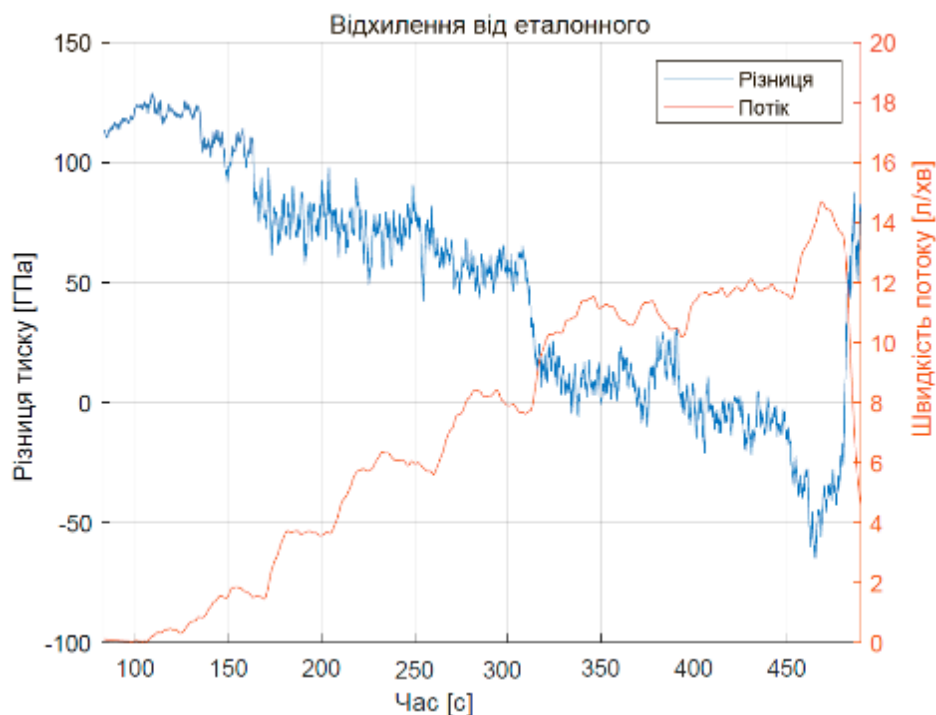
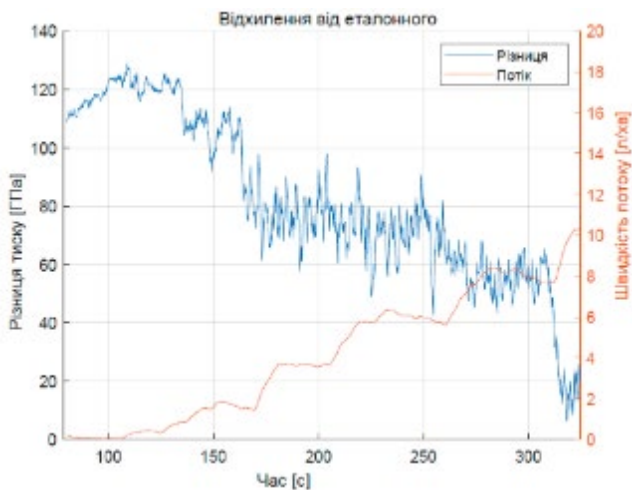
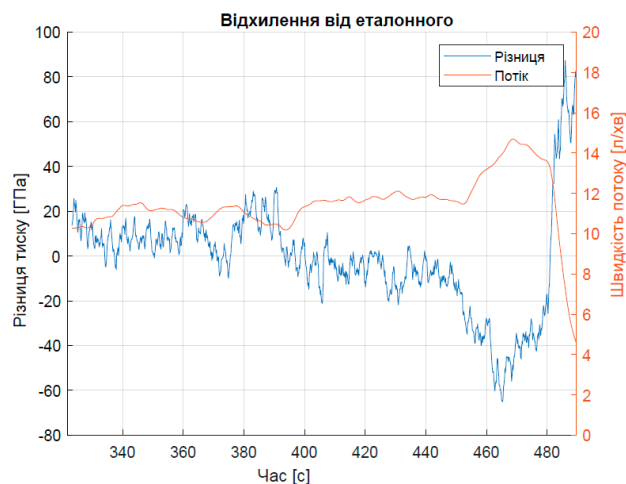


Рисунок 5.5 – Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним без жодного керування та повністю відкритого клапана



(а) Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним при потоках між 0-10 л/хв.



(б) Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним при потоках між 10-14 л/хв.

Рисунок 4.6 – Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним для різних інтервалів потоку. Контроль відсутній, клапан повністю відкритий

Таблиця 4.3 – Різниця тиску між вакуумом у колекторі та контрольним рівнем

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	8,1	12,9	0
55	10–14	– 0,15	8,7	– 6,5

У цьому випробуванні Pinch-клапан регулювався за допомогою контрольного значення, встановленого на постійний рівень вакууму 45 кПа.

Таблиця 4.4 – Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним

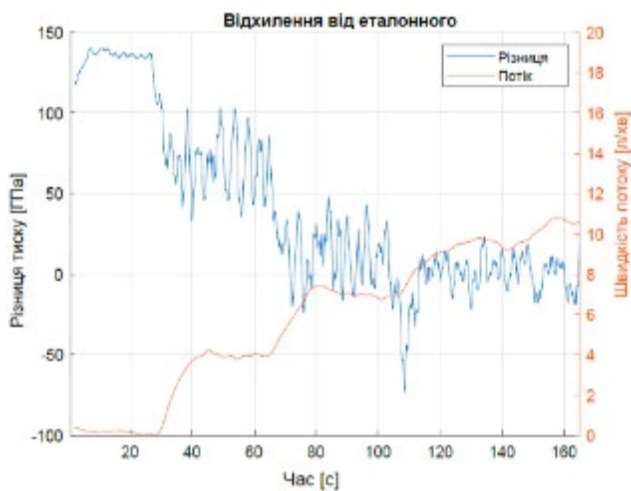
Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	3,9	14	– 7,3
55	10–14	(–) 1,04	2,6	– 5



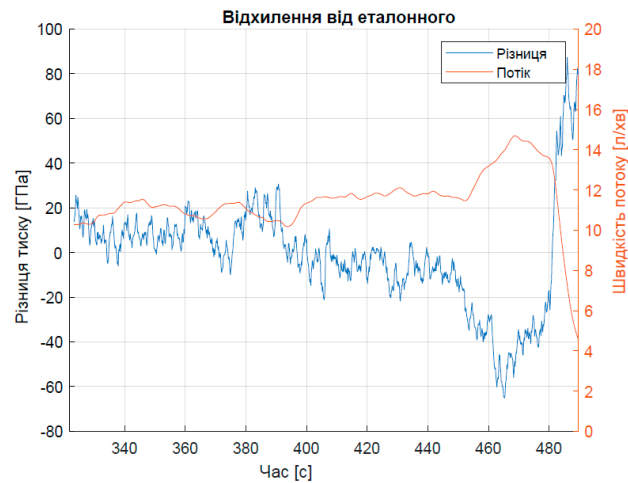
Рисунок 4.7 – Рівень вакууму в колекторі для різних витрат із постійним еталонним значенням 45 кПа



Рисунок 4.8 – Різниця тиску між вакуумом колекторі та еталонним для різних витрат



(а) Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним для швидкості потоку між 0-10 л/хв.



(б) Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним для швидкості потоку між 10-14 л/хв.

Рисунок 4.9 – Падіння вакууму над Pinch-клапаном із відповідними діапазонами потоку

Для цього випробування падіння вакууму датчик був розміщений до та після Pinch-клапана, коли клапан був повністю відкритий. Було проведено три випробування з різними збільшеннями швидкості потоку.

Таблиця 4.5 – Випробування 1: Падіння вакууму над поточним клапаном. Середнє падіння вакууму для різних витрат з мінімальним і максимальним показниками

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	0,97	4,8	– 7,7
55	10–14	0,79	2,6	– 1,3

Таблиця 4.6 – Випробування 2: Падіння вакууму над поточним клапаном. Середнє падіння вакууму для різних витрат з мінімальним і максимальним показниками

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	1,3	5,6	– 1,4
55	10–14	0,5	2,2	– 1,6

Таблиця 4.7 – Випробування 3: Падіння вакууму над поточним клапаном. Середнє падіння вакууму для різних витрат з мінімальним і максимальним показниками

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	1,5	2,8	– 2,2
55	10–14	0,77	2,4	– 0,72

Таблиця 4.8 – Падіння вакууму над Pinch-клапаном із середньою швидкістю потоку 10 л/хв. Дані, взято з тесту 1, наведені в таблиці 4.5

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–10	1,4	2,7	– 2,3



Рисунок 4.9 – Падіння вакууму над Pinch-клапаном під час випробування 1 для визначеного діапазону. Пунктирні лінії показують область, де середня швидкість потоку становить приблизно 10 л/хв

4.3 Випробування крайового випадку

Цей розділ охоплює результати тестування одного з граничних випадків, визначених у SR 7.

Цей тест було проведено, щоб імітувати ситуацію, коли один доїльний стакан зісковзує з дійки корови під час процесу доїння. Цей тест проводився при постійній швидкості потоку 8 л/хв. Ковзання було досягнуто ручним впусканням повітря в одну з доїльних чашок. Розрідження системи становило 55 кПа.

Таблиця 4.9 – Різниця тиску між колекторним вакуумом і еталонним під час тесту на ковзання доїльного стакану

Системний вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Максимальні коливання [кПа]	Мінімальні коливання [кПа]
55	0–8	1,9	12,2	– 12,4

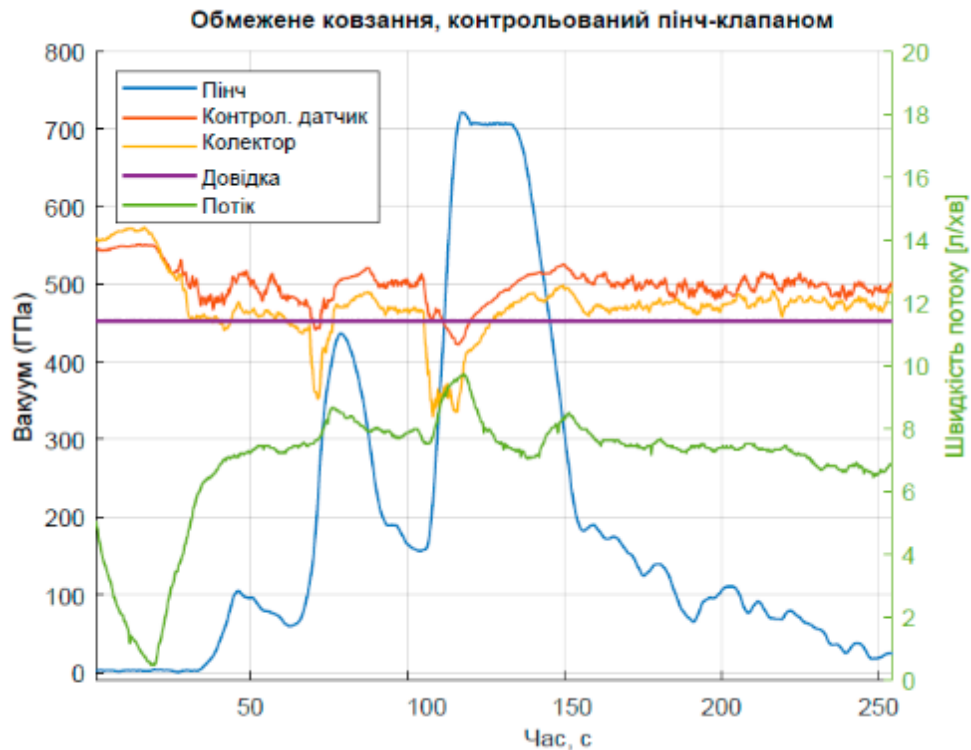


Рисунок 4.10 – Імітація ковзання одного з доїльних стаканів з постійним потоком 8 л/хв.

Коротке ковзання через 75 секунд і довше ковзання через 110 секунд

4.4 Аналіз результатів досліджень

Результати показали, що при впровадженні контролера для регулювання Pinch-клапана, рівень вакууму в доїльному колекторі може підтримуватись досить стабільним на встановленому референтному значенні. Однак через деякі обмеження у конструкції клапан не здатний повністю закритися при низьких

витратах потоку. Це призводить до надто високих рівнів вакууму при цих витратах. Це є причиною, чому рішення не відповідає вимогам щодо втрат вакууму при витратах від 0 до 10 л/хв. Для більших витрат різниця між вакуумом у колекторі та референтним рівнем зберігається близько 1 кПа, що відповідає вимогам TR2 з деяким запасом.

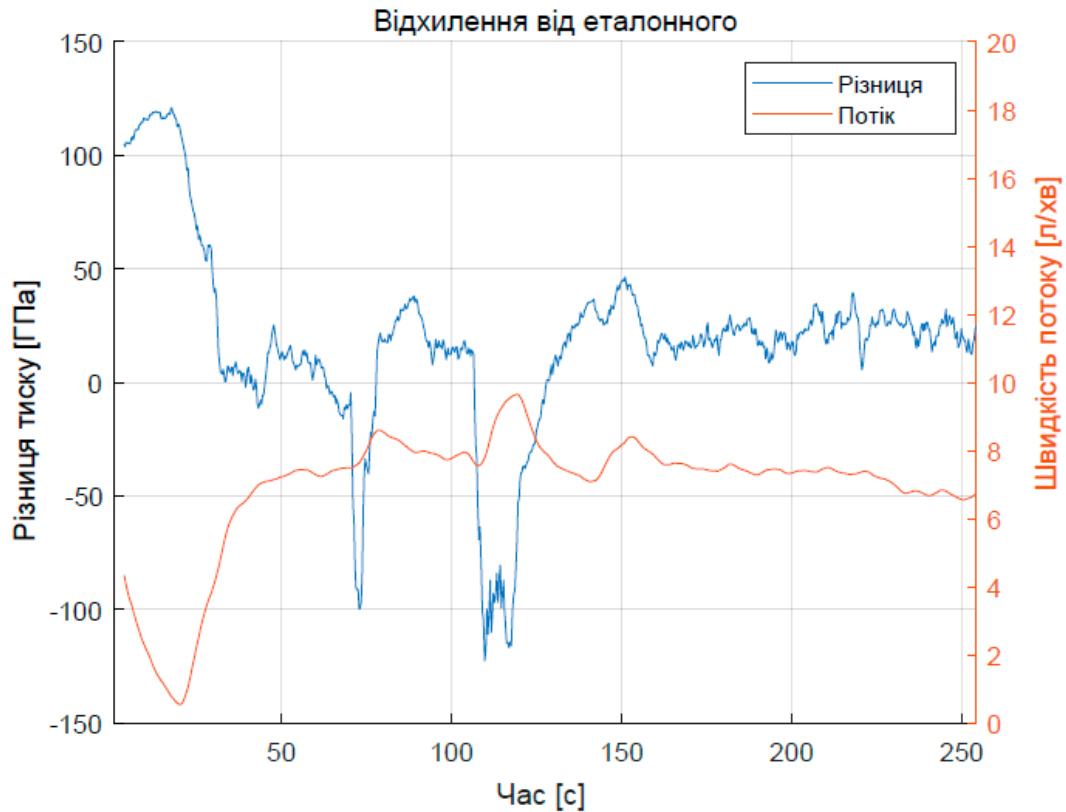


Рисунок 4.11 – Різниця тиску між колекторним вакуумом і еталонним під час тесту на ковзання доїльного стакану

Тест на валідацію проводився шляхом порівняння зниження вакууму в колекторі внаслідок різних витрат потоку при використанні інвертованого клапана заземлення з повністю відкритою конфігурацією. Ступінчасті зниження вакууму свідчать про те, що випробувальна установка працювала належним чином, і її було визнано адекватною для тестування.

Було обрано для дослідження граничний випадок зісковзування доїльного стакану. При зісковзуванні доїльного стакану відбувається втрата вакууму. Контролер намагається компенсувати раптову втрату, змінюючи вакуум у камері Pinch-клапана. Через деякий час рівень вакууму повертається до норми. Однак це обмежено нездатністю контролера компенсувати значне падіння вакууму на рівні всієї системи. Під час цього тесту вся система втратила 10 кПа, оскільки вакуумний насос просто не може компенсувати цей витік повітря. З використанням більш потужного вакуумного насоса компенсація повинна бути швидшою. Поясненням цього твердження є те, що вакуум у колекторі може підвищуватися лише шляхом відкриття клапана і дозволу системному вакууму його піднімати. Але якщо вся система втрачає вакуум, цей процес ускладнюється, і контролер стає повільнішим.

Після проведення всіх тестів було виявлено керований діапазон. Вакуум у доїльному колекторі можна контролювати в межах 40-50 кПа, коли вакуум у системі встановлено на рівні 55 кПа, а витрата води становить приблизно 8-10 л/хв. Коли референтне значення встановлено на 45 кПа, що є оптимальним рівнем, вакуум у колекторі можна успішно регулювати при витратах потоку в межах 6-12 л/хв.

Верхня межа керованого діапазону обмежується рівнем подачі вакууму в системі. При високих витратах понад 12 л/хв Pinch-клапан вже повністю відкритий і не може більше регулювати. Це означає, що для регулювання тиску в колекторі при витратах потоку понад 12 л/хв вакуум у системі має бути встановлений на вищому рівні спочатку. Вакуум у системі був обмежений до 55 кПа згідно з вимогою SR 3. Під час середньої доїльної сесії витрата молока досягає такого високого рівня лише на короткий період, тому покращення і розширення верхньої межі діапазону принесло б лише незначну користь.

Нижня межа керованого діапазону наразі обмежена тим, наскільки щільно Pinch-клапан може закриватися. У поточній конфігурації завжди спостерігається

невеликий потік води через клапан, навіть коли він повністю закритий. На початку та наприкінці процесу доїння витрата потоку буде в межах 0-4 л/хв.

Датчик тиску, який використовує контролер, відомий як контролерний датчик, спочатку був розміщений якомога далі від колектора. Це було зроблено для уникнення можливого контакту з коровою, яка має тенденцію зіштовхувати доїльний колектор і наступати на молочну трубку. Тому він був розміщений прямо перед клапаном, і це виявилось правильним рішенням, оскільки датчик міг помічати зміни тиску, що виникали через різні витрати потоку. Теоретично, датчик тиску можна перемістити ще далі від колектора, поки він знаходиться в молочній трубці. Датчик повинен бути здатний вловлювати тонкі зміни вакууму як функцію витрати для оцінки рівня вакууму в колекторі, що, в свою чергу, використовується для регулювання системи. Якщо датчик буде переміщено, лінійне рівняння, доведеться повторно калібрувати.

Датчик потоку був розміщений посередині системи для зручності доступу, але суб'єктивно не в найкращому місці, оскільки в реальних умовах він би знаходився прямо поруч з коровою. Однак датчик потоку можна без проблем перемістити, а можливо, навіть повністю прибрати. Падіння вакууму в колекторі пропорційне витраті потоку, а також вакууму на контролерному датчику. Це означає, що, маючи достатньо інформації про систему, можна розрахувати витрату потоку і, можливо, навіть визначити вакуум у колекторі без будь-якої інформації про витрату потоку, усуваючи необхідність у датчику потоку взагалі.

Різниця між вакуумом у колекторі та референтним значенням перевищувала 1 кПа при витратах потоку від 0 до 10 л/хв, що не відповідає вимозі SR 4. Клапан не може знизити вакуум настільки, щоб він відповідав референтному значенню при витратах потоку нижче 6 л/хв. Сигнал керування камерою Pinch-клапана дорівнює нульовому вакууму, тобто атмосферному тиску, що означає, що клапан повністю закритий. Лише коли витрата потоку перевищує 6 л/хв, вакуум у колекторі знижується до референтного рівня. Вище цього рівня потоку клапан

починає регулювати вакуум відповідно.

Для витрат потоку в діапазоні від 10 до 14 л/хв різниця між вакуумом у колекторі та референтним значенням була набагато меншою. До приблизно 12 л/хв інвертований клапан затиску все ще може регулювати тиск, але коли витрата потоку перевищує 12 л/хв, сигнал керування камерою Pinch-клапана досягає піку.

Як і очікувалося, падіння вакууму через сам клапан було дуже малим завдяки його конструкції. Для низьких витрат потоку в межах від 0 до 10 л/хв падіння вакууму через клапан у середньому становило близько 1-1,5 кПа для різних тестових випадків, і воно виявилось приблизно на рівні або трохи гіршим порівняно з поточною конструкцією. Чи це було пов'язано із самим клапаном, або просто із спорадичним характером потоку на цих рівнях, важко сказати, але результати обнадійливі. Для витрат потоку від 10 до 14 л/хв падіння вакууму через Pinch-клапан було дуже малим порівняно з поточним клапаном. Результати тестів показали, що середнє падіння варіювалося від 0,5 до 1 кПа, що було очікувано, оскільки клапан по суті є трубкою, як і будь-яка інша молочна трубка в системі.

Оскільки експериментальна установка була забезпечена водою з водопровідного крана, витрату потоку було дуже важко контролювати, і вона рідко була стабільною. Щоб дізнатися середнє падіння вакууму при витраті 10 л/хв, було обрано діапазон з тесту 1 так, щоб середня витрата відповідала цьому значенню. Результати цього тесту, де середня витрата становила 10,2 л/хв, свідчать, що призвело до падіння вакууму приблизно на 0,8 кПа, що відповідає вимозі зацікавлених сторін SR 1 щодо максимально допустимого падіння 1 кПа.

4.5 Висновки з розділу

1. Вимоги SR 1, SR 2, SR 3, TR 1 і SR 8 було успішно виконано, оскільки новий Pinch-клапан забезпечує падіння тиску менше 1 кПа при витраті 10 л/хв з

повністю відкритим клапаном на випробувальній установці, з конфігурацією низької лінії та вакуумом у системі 55 кПа. SR 4 було виконано частково.

2. TR 2 не було досягнуто, оскільки середнє падіння вакууму було більшим за максимально допустимі 1 кПа. TR 3 було досягнуто, оскільки середнє падіння вакууму було меншим за 2 кПа.

3. SR 5, TR 4 і TR 5 було виконано, оскільки як клапан, так і корпус датчика були спроектовані модульними та легкими для очищення, оскільки не мають малих камер або внутрішніх частин, де могли б накопичуватися забруднення. Конструкції є модульними, тому клапан можна легко замінити, і він достатньо міцний, щоб витримати вплив води та бруду.

4. SR 6 вважається виконаною лише частково, оскільки конструкції є геометрично безпечними для харчових продуктів, але поточний прототип виготовлено з матеріалу, не придатного для використання з харчовими продуктами (пластик PLA для 3D-друку). У реальному застосуванні матеріали, які контактують з молоком і не відповідають харчовим стандартам, можна легко замінити на харчові аналоги, виготовлені так само, як поточний клапан компанії DeLaval.

5. SR 7 було виконано, оскільки TR 7 вдалося протестувати, і контролер міг регулювати систему для врахування перешкод з незначними проблемами, обговореними в попередньому розділі.

6. Результати показують, що можливо створити електронно-регульований вакуумний запірний клапан для доїльних систем. Завдяки впровадженню Pinch-клапана, керованого простим мікроконтролером, рівень вакууму в доїльному колекторі слідує за референтним сигналом, встановленим на 45 кПа, при витратах потоку від 6 до 12 л/хв з мінімальним падінням вакууму. Крім того, впровадивши деякі незначні вдосконалення та зміни, обговорені в попередніх розділах, можна буде розширити робочий діапазон і підвищити ефективність Pinch-клапана.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці на молочно-товарній фермі передбачає комплекс організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних і здорових умов праці для працівників. Під час експлуатації доїльних установок існує низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на здоров'я та безпеку робітників, тому необхідно дотримуватися правил безпеки і використовувати засоби індивідуального захисту.

Основною метою охорони праці є запобігання виникненню нещасних випадків та професійних захворювань серед працівників, які обслуговують доїльні установки. Для цього на фермі повинна бути організована система управління охороною праці, яка включає навчання персоналу, проведення інструктажів, регулярні медичні огляди та контроль за виконанням правил безпеки.

Небезпечні та шкідливі фактори у робочому середовищі. При експлуатації доїльних установок на молочно-товарних фермах працівники піддаються впливу таких небезпечних і шкідливих факторів:

– ***Механічні небезпеки.*** Рухомі частини доїльних машин та агрегатів можуть становити небезпеку травмування. Наприклад, можливі випадки защемлення рук або попадання частин одягу у рухомі механізми.

– ***Шум та вібрація.*** Робота доїльних установок супроводжується шумом і вібраціями, які можуть призводити до розвитку професійних захворювань, зокрема захворювань органів слуху та нервової системи.

– ***Електричні небезпеки.*** Доїльні установки використовують електричні двигуни та інше електрообладнання, що може стати причиною ураження електричним струмом у разі несправності або недотримання правил експлуатації.

– ***Біологічні небезпеки.*** Контакт з тваринами, що можуть переносити інфекційні захворювання (лептоспіроз, туберкульоз тощо), а також

обслуговування забруднених молочних систем можуть стати причиною інфікування працівників.

– **Хімічні небезпеки.** Використання хімічних засобів для очищення та дезінфекції доїльних установок може призвести до контакту з токсичними речовинами, що викликають подразнення шкіри, органів дихання або алергічні реакції.

– **Фізичні фактори.** Температурні коливання, підвищена вологість та незадовільні умови освітлення можуть негативно впливати на працездатність і здоров'я працівників.

Методи захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих факторів. Для мінімізації впливу небезпечних і шкідливих факторів при роботі з доїльними установками застосовуються такі заходи.

1. Засоби індивідуального захисту:

– Використання захисного одягу, рукавичок, взуття та спеціальних окулярів з метою захисту від механічних травм, контакту з хімічними речовинами та біологічними агентами.

– Для зменшення впливу шуму працівники повинні користуватися протишумними навушниками або вушними вкладками.

2. Технічні засоби захисту:

– Обладнання доїльних установок огорожами для запобігання випадковому контакту з рухомими частинами.

– Встановлення системи захисту від ураження електричним струмом, включаючи заземлення, автоматичні вимикачі та регулярні перевірки справності електрообладнання.

3. Організаційні заходи:

– Регулярне проведення інструктажів з охорони праці для всіх працівників, що залучені до експлуатації доїльних установок.

– Забезпечення безпечної організації робочих місць, належного освітлення, вентиляції та умов праці на фермі.

– Систематичне медичне обстеження працівників, що дозволяє вчасно виявляти професійні захворювання та ураження.

4. Санітарно-гігієнічні заходи:

– Використання засобів для очищення та дезінфекції доїльного обладнання, які відповідають санітарним вимогам та не становлять загрози для здоров'я працівників.

– Регулярне прибирання робочого місця для запобігання накопиченню пилу та бруду, які можуть бути джерелом хімічних та біологічних небезпек.

Правила безпечного виконання робіт з доїльним обладнанням. Для безпечної експлуатації доїльного обладнання необхідно дотримуватися таких правил:

1. Перед початком роботи з доїльною установкою працівники повинні переконатися в її справності та відсутності видимих пошкоджень. Забороняється експлуатація несправного обладнання.

2. Перед запуском доїльної установки необхідно перевірити стан електричної проводки та заземлення, щоб уникнути ураження струмом.

3. Робота з доїльними установками повинна виконуватися в захисному одязі, взутті та з використанням засобів індивідуального захисту.

4. Забороняється під час роботи торкатися рухомих частин установки та працювати в зоні обертання деталей.

5. У разі виникнення несправності або підозри на несправність необхідно негайно зупинити установку та повідомити керівництво.

6. Дезінфекція та технічне обслуговування обладнання повинні проводитися лише після повної зупинки та відключення від електричної мережі.

7. Під час роботи працівники повинні стежити за станом свого здоров'я та не допускати надмірної втоми, що може призвести до зниження уваги та підвищення ризику травмування.

Дії в надзвичайних ситуаціях. При виникненні надзвичайних ситуацій на молочно-товарній фермі, таких як пожежа, ураження електричним струмом або аварія на доїльній установці, необхідно дотримуватися таких дій:

1. Пожежа:

– негайно відключити електричне обладнання та повідомити про пожежу за телефоном 101.

– За можливості, евакуювати тварин та працівників із зони небезпеки.

– Використовувати первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники) для локалізації вогнища до прибуття пожежної команди.

2. Ураження електричним струмом:

– негайно відключити електроживлення та надати першу допомогу постраждалому.

– За необхідності викликати швидку медичну допомогу за телефоном 103.

3. Аварія на доїльній установці:

– Зупинити роботу установки та оцінити ситуацію.

– Якщо виникла загроза здоров'ю або життю, негайно евакуювати працівників та повідомити керівництво.

– Вжити заходів для усунення несправностей лише після відключення обладнання від електричної мережі та отримання відповідних інструкцій від технічного персоналу.

Дотримання зазначених заходів дозволить забезпечити безпеку праці на молочно-товарній фермі та мінімізувати ризики виникнення надзвичайних ситуацій.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА

Щоб розрахувати економічну ефективність удосконаленого доїльного апарата, потрібно провести кілька обчислень. Розглянемо кожен етап окремо.

1. Витрати на оплату праці

Розрахунок витрат на оплату праці для базового та удосконаленого апаратів:

- Кількість годин доїння на день: $2 \times 2 = 4$ години

- Кількість днів на рік: 365 днів

Витрати на оплату праці в рік:

Витрати на оплату праці = 4 години/день \times 365 днів/рік \times 80 грн/год =
116800 грн/рік

2. Річна амортизація базового та удосконаленого апарата розраховується як 20% від вартості:

- Амортизація базового апарата:

Амортизація базового апарата = 4000 грн \times 0.20 = 800 грн/рік

- Амортизація удосконаленого апарата:

Амортизація удосконаленого апарата = 5000 грн \times 0.20 = 1000 грн/рік

3. Оскільки в умові не вказані конкретні витрати на ремонт, припустимо, що витрати на ремонт є частиною амортизаційних витрат і враховані в них.

4. Загальні витрати (амортизація + витрати на оплату праці):

- Для базового апарата:

Загальні витрати базового апарата = 116800 грн + 800 грн = 117600 грн/рік

- Для удосконаленого апарата:

Загальні витрати удосконаленого апарата = 116800 грн + 1000 грн =
117800 грн/рік

5. Річний економічний ефект:

Для розрахунку річного економічного ефекту потрібно знати додаткову продуктивність молока, яку можна отримати з удосконаленим апаратом:

- Збільшення швидкості молоковіддачі: $1.45 - 1.4 = 0.05$ л/хв

- Кількість доїнь на рік: $4 \text{ години/день} \times 60 \text{ хвилин/год} \times 365 \text{ днів} = 87600$

хвилин

- Додатковий обсяг молока за рік:

Додатковий обсяг молока = $0.05 \text{ л/хв} \times 87600 \text{ хвилин} = 4380 \text{ л/рік}$

- Додатковий дохід від продажу молока:

Додатковий дохід = $4380 \text{ л} \times 9.3 \text{ грн/л} = 40734 \text{ грн/рік}$

6. Строк окупності додаткових капіталовкладень:

Додаткові капіталовкладення на удосконалення:

Додаткові капіталовкладення = $5000 \text{ грн} - 4000 \text{ грн} = 1000 \text{ грн}$

Річний економічний ефект:

Річний економічний ефект = Додатковий дохід - Додаткові витрати на амортизацію = $40734 \text{ грн} - 1000 \text{ грн} = 39734 \text{ грн/рік}$

Строк окупності = Додаткові капіталовкладення/Річний економічний ефект
= $1000 \text{ грн} / 39734 \text{ грн/рік} = 0.25$ року

Підсумок:

- Річні витрати на оплату праці: 116800 грн

- Річна амортизація базового апарата: 800 грн

- Річна амортизація удосконаленого апарата: 1000 грн

- Загальні витрати (базовий): 117600 грн

- Загальні витрати (удосконалений): 117800 грн

- Річний економічний ефект: 39734 грн

- Строк окупності додаткових капіталовкладень: ≈ 0.25 року (приблизно 91 днів)

Удосконалений доїльний апарат дає значний економічний ефект завдяки підвищенню продуктивності.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження стабілізації вакуумного режиму доїльних установок показують, що збільшення обсягу вакуумного балону або системи може підвищити продуктивність вакуумних насосів. Проте, ці підходи не повністю розкривають причини флуктуацій вакууму і не пропонують ефективних рішень для їх усунення. Нестабільність вакууму в доїльних установках обумовлена як технічними несправностями, так і принциповими особливостями системи доїння. Для забезпечення ефективного доїння і підтримання високої продуктивності корів необхідно забезпечити стабільність вакуумного режиму в доїльних установках. Оптимальний вакуумний режим варіюється від 42 до 53 кПа, і його нестабільність може призвести до проблем з молоковіддачею, зниження жирності молока та загальної продуктивності. Урахування технічних характеристик вакуумних насосів та резерву повітря є критично важливим для підтримки постійного рівня вакууму і покращення якості молока.

2. Розглянуто вимоги до нового клапана відсічення та системи регулювання вакууму в доїльних установках. Зокрема, акцентовано увагу на необхідності мінімізації падіння вакууму через клапан, контролі за коливаннями вакууму при різних потоках молока, а також відповідності матеріалів нормам контактів з харчовими продуктами. Також підкреслено важливість модульної конструкції для обслуговування та тестування обладнання. Зокрема, для досягнення високої ефективності та надійності системи, всі технічні рішення повинні враховувати як стабільність вакууму, так і відповідність стандартам якості матеріалів.

3. Аналіз вакуумного падіння в молочній трубці показує, що вакуумне падіння залежить від кількох факторів, таких як об'ємний повітряний коефіцієнт, густина молока, довжина та діаметр трубки, швидкість потоку і коефіцієнти втрат. Падіння вакууму зростає зі збільшенням швидкості потоку, і його значення завжди буде ненульовим, незалежно від конструкції системи доїння. Вибір конструкції

клапана залежить від його здатності уникати забруднень і підтримувати точність регулювання потоку. Pinch-клапани, діафрагмові клапани та вентильні клапани мають свої переваги і недоліки. Pinch-клапани, завдяки своїй конструкції, добре підходять для харчових застосувань, де важливо уникати мертвих об'ємів і забруднень. Під час роботи пневматичного Pinch-клапана важливо враховувати знос гумового рукава через пульсацію. Розрахунки показують, що термін служби гуми рукава є приблизно 160 годин, що відповідає технічній документації. З урахуванням умов експлуатації, рукав слід замінювати кожні 40 днів при регулярному використанні.

4. Результати показують, що можливо створити електронно-регульований вакуумний запірний клапан для доїльних систем. Завдяки впровадженню Pinch-клапана, керованого простим мікроконтролером, рівень вакууму в доїльному колекторі слідує за референтним сигналом, встановленим на 45 кПа, при витратах потоку від 6 до 12 л/хв з мінімальним падінням вакууму. Крім того, впровадивши деякі незначні вдосконалення та зміни, обговорені в попередніх розділах, можна буде розширити робочий діапазон і підвищити ефективність Pinch-клапана.

5. Удосконалений доїльний апарат забезпечує значний економічний ефект порівняно з базовим апаратом завдяки збільшенню швидкості молоковіддачі. Хоча річні витрати на амортизацію удосконаленого апарата вищі (1000 грн) у порівнянні з базовим (800 грн), загальні витрати за рік є лише на 200 грн більшими. Однак додатковий дохід від продажу молока, який становить 40734 грн на рік, компенсує ці витрати. Строк окупності додаткових капіталовкладень на удосконалення апарата складає приблизно 91 день, що підтверджує високий рівень економічної вигоди від використання удосконаленого обладнання.

Бібліографія

1. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
2. Шевченко, І.А., Алієв, Е.Б. (2013). Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок. За редакцією доктора технічних наук, професора, член-кореспондента НААН України, І.А. Шевченка – Запоріжжя: Акцент Інвест-трейд. 156 с. ISBN 978-966-2602-41-VIII.
3. Хмельовський, В. С., Павленко, С. І., Линник, Ю. О., Дудін, В. Ю., Алієв, Е. Б. (2017). Механіко-технологічні основи використання вакуумних насосів доїльних установок: монографія. К. : ЦП "Компринт".177 с. ISBN 978-966-929-645-0.
4. Paliy A., Aliiev E., Nanka A., Bogomolov O., Bredixin V., Paliy A., Shkromada O., Musiienko Y., Stockiy A., Grebenik N.. Identifying changes in the technical parameters of milking rubber under industrial conditions to elucidate their effect on the milking process. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, Issue 1 (111), 2021. 21–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231917>
5. Gunko I., Babyn I., Aliiev E., Yaropud V., Hrytsun A. Research into operating modes of the air injector of the milking parlor flushing system. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 83, Issue 2, 2021. 297–310. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez4fb_469127.pdf
6. Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Nechyporenko, O., Baidevliatova, Y., Baydevliatov, Y., Lazorenko, A., Ukhovskyi, V., Korniienko, L., Sharandak, P. (2021). Determining the efficiency of cleaning a milk line made from different materials from contaminants. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (112)), 76–85. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237070>

7. Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Ishchenko, K., Lukyanov, I., Dobrovolsky, V., Yurchenko, O., Chekan, O., Dedilova, T., & Musiienko, Y. (2021). Revealing changes in the technical parameters of the teat cup liners of milking machines during testing and production conditions. *EUREKA: Physics and Engineering*, (6), 102-111. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.002056>

8. Aliiev E., Paliy A., Kis V., Paliy A., Petrov R., Plyuta L., Chekan O., Musiienko O., Ukhovskiy V., Korniiien L. (2022). Establishing the influence of technical and technological parameters of milking equipment on the efficiency of machine milking. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (115)), 44–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251172

9. Aliiev, E., Paliy, A., Dudin, V., Kis, V., Paliy, A., Ostapenko, V., Levchenko, I., Prihodko, M., Korg, O., Kladnytska, L. (2022). Establishing an interconnection between the technical and technological parameters of milking equipment based on the movement of a milk-air mixture in a milking machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (116)), 35–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253978>.

10. Aliiev, E., Paliy, A., Kis, V., Milenin, A., Ishchenko, K., Paliy, A., Levchenko, I., Livoshchenko, L., Livoshchenko, Y., Plyuta, L. (2022). Justifying parameters for the automatic servo control system of a rotary plate vacuum pump in the milking machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (118)), 80–89. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262215

11. Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Kotko, Y., Kolinchuk, R., Livoschenko, E., Chekan, O., Nazarenko, S., Livoschenko, L., Uskova, L. (2022). Determining the effective mode of operation for the system of washing the milking machine milk supply line. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 74–81. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.265778

12. Aliiev E., Paliy A., Paliy A., Kis V., Levkin A., Kotko Y., Levchenko I., Shkurko M., Svysenko S., Sevastianov V. Increasing energy efficiency and enabling the

process of vacuum mode stabilization during the operation of milking equipment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. 6 (1 (120)), 62–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.267799

13. Paliy A., Aliiev E., Paliy A., Ishchenko K., Rybalko I., Pavlichenko O., Prihodko M., Popsui V., Bondarchuk L., Chernyavskaya T. (2023). Establishing changes in the parameters of teat rubber for milking machines during testing and under industrial conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (1 (121)), 58–66. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272030>

14. Пат. 67798 Україна, МПК (2012) А 01J7/00. Пристрій для контролю технічних параметрів доїльних установок / Е.Б. Алієв, О.С. Тісліченко; заявник і патентовласник Ін-т мех. тв-ва НААН. – № u 2011 08417; заявл. 04.07.2011; опублік. 12.03.2012, Бюл. №5, 2012 р.

15. Алієв Е. Дослідження спрацьованості дійної гуми доїльного апарату з урахуванням теорії старіння на основі плоскої задачі // Е. Алієв // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. пр. ІМТ НААН – Запоріжжя, 2010. – Вип. 1(5,6). – С.233-242.

16. Алієв Е.Б. Теоретичне дослідження впливу технічних параметрів доїльної установки на швидкість молоковіддачі / Е.Б. Алієв // Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка – Харків, 2011. – Вип. 108. – С. 92-98.

17. Алієв Е.Б. Конструкційно-технологічна схема комплексу устаткування контролю вакуумметричних параметрів доїльного обладнання / Е.Б. Алієв, О.С. Тісліченко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Кіровоградський національний технічний університет – Кіровоград, 2011. – Вип. 41. – С. 429-432.

18. Алієв Е.Б. Теоретична оцінка показників надійності вакуумної системи доїльні установки / Е.Б. Алієв, Т.А. Похальчук // Науковий вісник

Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки: Луганський національний аграрний університет – Луганск, 2011. – Вип. 29. – С. 57-66.

19. Алієв Е.Б. Техніко-економічне обґрунтування застосування методики прогнозування ресурсу молочно-доїльного обладнання / Е.Б. Алієв // Зб. наук. праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки – Вінниця, 2012. – Вип. 10, т. 2. – С. 36-39.

20. Алієв Е.Б. Етапи налагодження якісного технічного сервісу молочно-доїльного обладнання / Е.Б. Алієв // Інженерія природокористування – 2015 – №2(4) – с. 46-50.

21. Алієв Е. Б., Буйницький О. І., Гусар І. М. Тестер доїльних установок. Materialy XVIII Mezinarodni Vdecko – Prakticka Konference, Modernivy Mozenosti Vedy – 2021 (22-30 ledna 2021 r.). Volume 3. Praha: Publishing House «Education and Science», 2021. P. 42-45.

22. Алієв Е. Б., Яропуд В. М., Бабин І. А., Буйницький О. І. Результати випробування тестера доїльних установок v. 2.0. Техніка, енергетика, транспорт АПК. №1 (112). 2021. С. 4-14. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-1.

23. Evershed, Richard P., et al. "Earliest Date for Milk Use in the Near East and Southeastern Europe Linked to Cattle Herding." *Nature*, vol. 455, no. 7212, Sept. 2008, pp. 528–531. *Nature*, <https://www.nature.com/articles/nature07180>. Accessed 4 Nov. 2022.

24. Sandrucci, A., et al. "Factors Affecting Milk Flow Traits in Dairy Cows: Results of a Field Study." *Journal of Dairy Science*, vol. 90, no. 3, Mar. 2007, pp. 1159–1167. *Journal of Dairy Science*, [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(07\)71602-8/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(07)71602-8/fulltext). Accessed 16 May 2022.

25. Spencer, Stephen B. "Recent Research and Developments in Machine Milking—A Review." *Journal of Dairy Science*, vol. 72, no. 7, July 1989, pp. 1907–1917. ScienceDirect,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030289793103>. Accessed 28 Mar. 2022.

26. van Reenen, C. V., et al. "Individual Differences in Behavioral and Physiological Responsiveness of Primiparous Dairy Cows to Machine Milking." *Journal of Dairy Science*, 2002, doi:10.3168/JDS.S0022-0302(02)74338-5.

27. International Organization for Standardization (ISO). Standard - Milking Machine Installations - Vocabulary (ISO 3918:2007, IDT) SS-ISO 3918:2007. International Organization for Standardization, 2007, <https://www.sis.se/produkter/terminologi-och-dokumentation/ordlistor/jordbruk/ssiso39182007/>. Accessed 9 May 2022.

28. DeLaval. Clusters - DeLaval. <https://www.delaval.com/en-nz/discoverour-farm-solutions/milking-essentials/at-the-milking-point/clusters/>. Accessed 18 Dec. 2022.

29. Akam, D., F. H. Dodd, and A. Quick. Milking, Milk Production Hygiene and Udder Health. *FAO Animal Production and Health Paper*, Jan. 1989, <https://www.semanticscholar.org/paper/Milking%2C-milk-production-hygiene-and-udder-health-Akam-Dodd/>. Accessed 17 May 2022.

30. International Organization for Standardization (ISO). Standard - Milking Machine Installations - Mechanical Tests (ISO 6690:2007, IDT) SS-ISO 6690:2007. International Organization for Standardization, 2007, <https://www.sis.se/produkter/jordbruk-0faca7db/lantbruksbyggnader-konstruktioner-och-installationer/ladugardsbyggnader/ssiso66902007/>. Accessed 9 May 2022.

31. Stauffer, Claudia, Martina Feierabend, and Rupert M. Bruckmaier. "Different Vacuum Levels, Vacuum Reduction During Low Milk Flow, and Different Cluster Detachment Levels Affect Milking Performance and Teat Condition in Dairy Cows." *Journal of Dairy Science*, vol. 103, no. 10, Oct. 2020, pp. 9250–9260. Elsevier, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030220305932>. Accessed 14 Apr. 2022.

32. Ambord, S., and R. M. Bruckmaier. "Milk Flow-Dependent Vacuum Loss in High-Line Milking Systems: Effects on Milking Characteristics and Teat Tissue Condition." *Journal of Dairy Science*, vol. 93, no. 8, Aug. 2010, pp. 3588–3594. ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030210003772>. Accessed 28 Mar. 2022.
33. Enokidani, Masafumi, et al. "Milking Performance Evaluation and Factors Affecting Milking Claw Vacuum Levels with Flow Simulator." *Animal Science Journal*, vol. 88, no. 8, 2017, pp. 1134–1140. Wiley Online Library, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/asj.12741>. Accessed 28 Mar. 2022.
34. Bade, R. D., et al. "Interactions of Vacuum, B-Phase Duration, and Liner Compression on Milk Flow Rates in Dairy Cows." *Journal of Dairy Science*, vol. 92, no. 3, Mar. 2009, pp. 913–921. ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030209703996>. Accessed 16 May 2022.
35. Odorčić, M., et al. "Review: Milking Machine Settings, Teat Condition and Milking Efficiency in Dairy Cows." *Animal*, vol. 13, 2019, pp. s94–s99. Elsevier, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751731119000417>. Accessed 28 Mar. 2022.
36. Besier, J., O. Lind, and R. M. Bruckmaier. "Dynamics of Teat-End Vacuum During Machine Milking: Types, Causes and Impacts on Teat Condition and Udder Health – A Literature Review." *Journal of Applied Animal Research*, vol. 44, no. 1, Jan. 2016, pp. 263–272. doi:10.1080/09712119.2015.1031780. Accessed 28 Mar. 2022.
37. Besier, J., and R. M. Bruckmaier. "Vacuum Levels and Milk-Flow-Dependent Vacuum Drops Affect Machine Milking Performance and Teat Condition in Dairy Cows." *Journal of Dairy Science*, vol. 99, no. 4, Apr. 2016, pp. 3096–3102. ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216000990>. Accessed 31 Mar. 2022.

38. Hillerton, Eric, J. Pankey, and P. Pankey. "Effect of Over-Milking on Teat Condition." *The Journal of Dairy Research*, vol. 69, Mar. 2002, pp. 81–84. doi:10.1017/S0022029901005386.
39. Rasmussen, M. D., and N. P. Madsen. "Effects of Milkline Vacuum, Pulsator Airline Vacuum, and Cluster Weight on Milk Yield, Teat Condition, and Udder Health." *Journal of Dairy Science*, vol. 83, no. 1, Jan. 2000, pp. 77–84. ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030200748582>. Accessed 22 May 2022.
40. Reinemann, D. J., et al. "Effects of Flow-Controlled Vacuum on Milking Performance and Teat Condition in a Rotary Milking Parlor." *Journal of Dairy Science*, vol. 104, no. 6, June 2021, pp. 6820–6831. ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203022100446X>. Accessed 31 Mar. 2022.
41. International Organization for Standardization (ISO). Standard - Milking Machine Installations - Construction and Performance ISO 5707:2007. International Organization for Standardization, 2007, <https://www.sis.se/produkter/jordbruk-0faca7db/lantbruksbyggnader-konstruktioner-och-installationer/ladugardsbyggnader/iso57072007/>. Accessed 26 Apr. 2022.
42. Golisz, Ewa, et al. "Simulation Tests of a Cow Milking Machine—Analysis of Design Parameters." *Processes*, vol. 9, no. 8, Aug. 2021, p. 1358. MDPI, <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/8/1358>. Accessed 31 Mar. 2022.
43. BEARD, C. S., J. B. ARANT, and B. G. LIPTÁK. "Pinch Valves." *Process Control*, edited by Béla G. Lipták, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 1995, pp. 492–500. doi:10.1016/B978-0-7506-2255-4.50061-1. Accessed 23 May 2022.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Розробка конструкції і обґрунтування параметрів
клапана доїльного апарата**

Додатки

Виконав: магістрант групи МГАІ-2-23
Черник Ярослав Віталійович

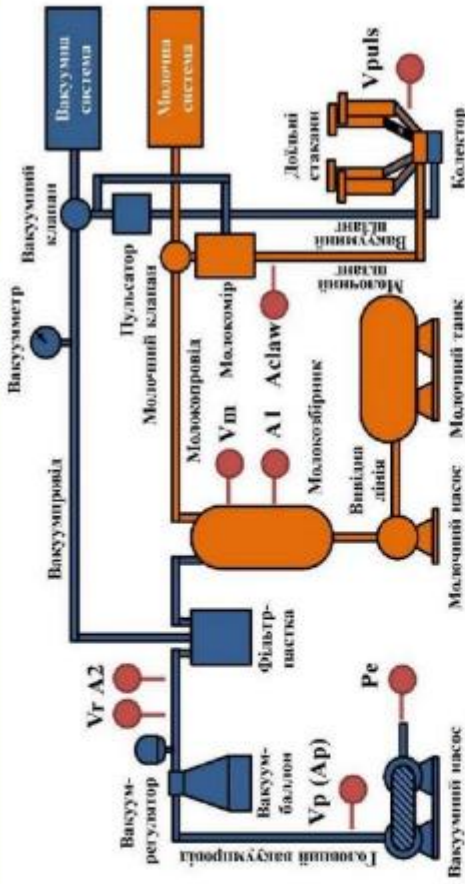
Керівник: д-р техн. наук, страш. дослід.
Алієв Ельчин Бахтияр огли

Дніпро, 2024

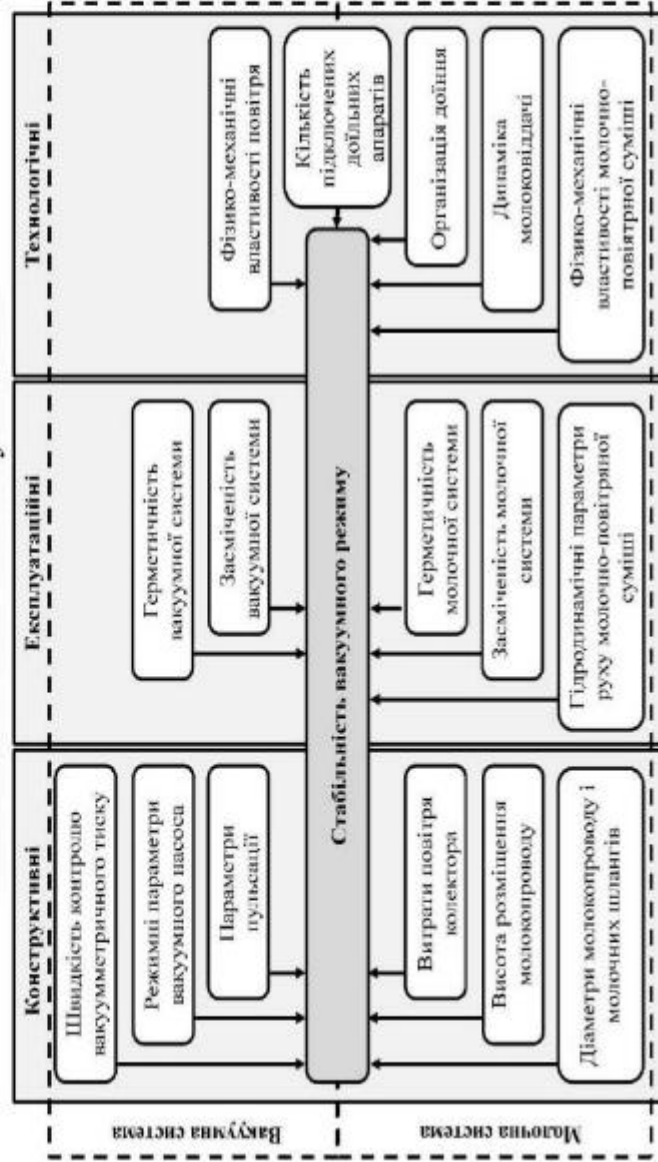
Метою є розробка нового типу електронно-керованого клапана, розташованого в молочної трубі для регулювання вакууму в колекторі за допомогою датчиків тиску.

Для досягнення цієї мети передбачається виконати наступні **задачі досліджень**:

1. Провести аналіз стану дестабілізації вакууму в доїльних установках, визначити основні причини коливань і сформулювати вимоги до системи підтримання стабільного вакууму.
2. Розробити конструкційно-технологічну схему доїльного апарата з використанням Pinch-клапана, виконати теоретичний аналіз його роботи та обґрунтувати вибір раціональної конструкції.
3. Розробити та створити лабораторний стенд для експериментальних досліджень, що забезпечує моделювання реальних умов роботи доїльного апарата.
4. Провести аналітичні та експериментальні дослідження роботи Pinch-клапана, включаючи крайові випадки, для оцінки його впливу на стабільність вакууму та ефективність системи.
5. Розробити систему датчиків і керування для моніторингу та регулювання роботи доїльного апарата, виконати верифікацію розроблених рішень шляхом порівняння теоретичних та експериментальних даних.
6. Оцінити технічну, економічну ефективність удосконаленого доїльного апарата та розробити рекомендації з охорони праці й безпеки під час його експлуатації.



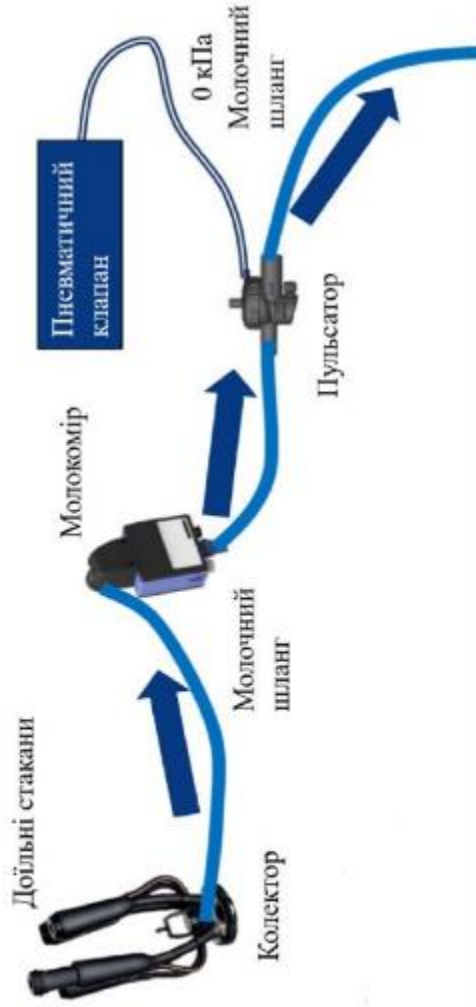
Технологічна схема доїльної установки



Взаємозв'язок параметрів доїльної установки із вакуумом

Основні вимоги до розробки клапану доїльного апарата

1. Новий клапан відсічення має бути розроблений з урахуванням вимог щодо контактів з харчовими продуктами, а падіння вакууму через клапан відсічення має бути менше 1 кПа при 10 л/хв з повністю відкритим клапаном.
2. Верхня межа на вакуум системи – максимум 55 кПа.
3. При потоці 0-10 л/хв і еталонному значенні між 30-50 кПа на кластері коливання вакууму не повинні перевищувати ± 1 кПа.
4. При потоці 10-14 л/хв і еталонному значенні між 30-50 кПа на кластері коливання вакууму не повинні перевищувати ± 2 кПа.
5. Розміщення датчиків та іншої електроніки не повинно обмежувати/впливати на можливість обслуговування обладнання.
6. Все нове обладнання, яке буде використовуватися в системі, повинно відповідати нормам щодо контакту з харчовими продуктами (ISO-стандарт 5707:2007).



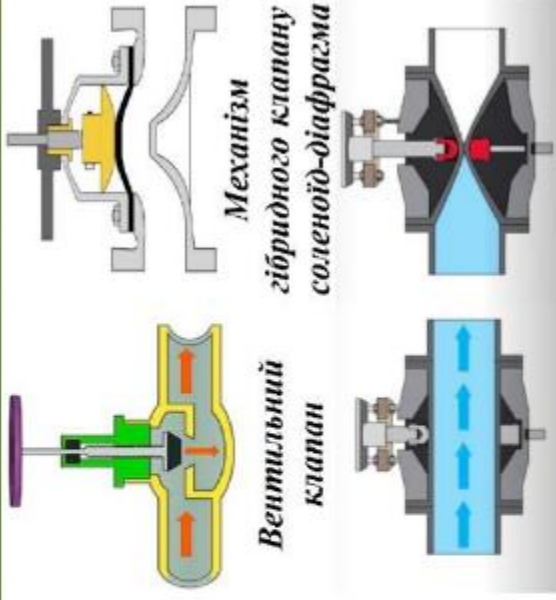
Молочна лінія, рівень вакууму 45-50 кПа

Поточна конструкція дойльного апарата від компанії DeLaval

Падіння вакууму в молочному шлангу дойльного апарата

$$\Delta P = \left(1 - \frac{\frac{Q_a \cdot P_{atm}}{A_t (P_o + \frac{\Delta P}{2})}}{1.2 \left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a \cdot P_{atm}}{A_t (P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right) + v_{\infty}} \right) \times \left(\rho_m g H + \lambda \rho_m \frac{L_t}{D} + \xi \rho_m \frac{L_t}{D} \left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a \cdot P_{atm}}{A_t (P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right)^2 \right) + \frac{L_t \left(\frac{Q_m}{A_t} + \frac{Q_a \cdot P_{atm}}{A_t (P_o + \frac{\Delta P}{2})} \right)^2}{2}$$

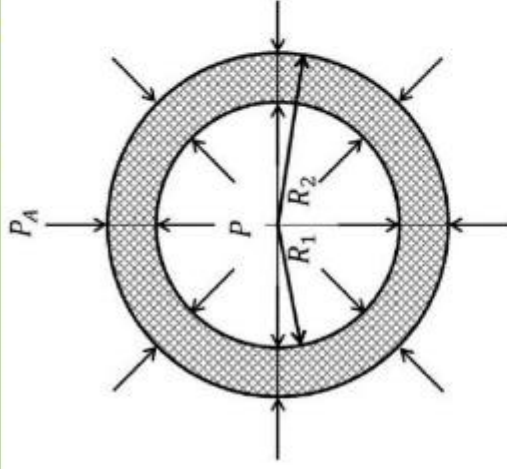
де Q_m , Q_a – витрати молока [$кг \cdot хв^{-1}$] та повітря [$м^3 год^{-1}$]; D – діаметр трубки для молока [м]; L_t – довжина трубки для молока [м]; P_o – робочий тиск [кПа]; P_{atm} – атмосферний тиск в нормальних умовах [кПа]; ρ_m , ρ_a – густина молока та повітря [$кг м^{-3}$]; A_t – перетин трубки для молока [$м^2$]; v_{∞} – швидкість підйому однієї бульбашки в спокійній рідині [$мс^{-1}$]; T – температура [К]; R – газова константа для повітря [287 Дж $кг^{-1} K^{-1}$]; σ – поверхневий натяг рідини [$Нм^{-1}$].



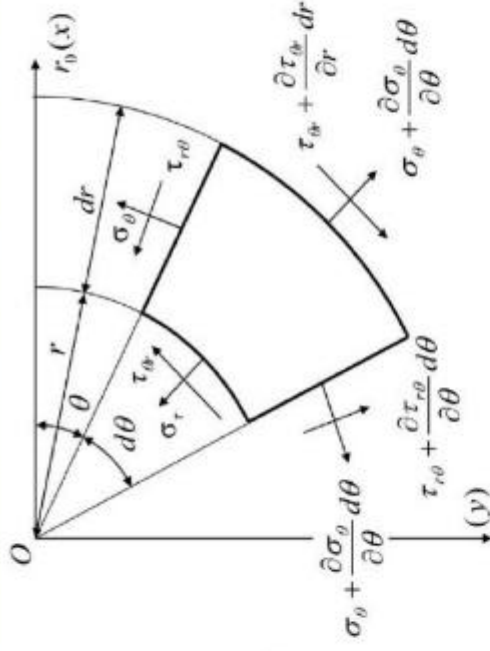
Rinsh-клапан

Матриця оцінки відповідності конструкторській клапана вимогам

Критерії	Вага	Концепція (1-5)		
		Rinsh-клапан	Гібридний клапан	Базовий
Легкість впровадження	5	3	3	4
Вартість	3	2	3	5
Вартість обслуговування	3	3	4	3
Безпека харчових продуктів	5	5	3	1
Легкість керування	3	4	2	4
Легкість очищення	4	5	5	3
Можливість розширення в майбутньому	1	5	4	1
Функціональність у крайових випадках	3	3	1	3
Загальна оцінка (Вага × Концепція)		101	84	83



Поперечний переріз рукава у пневматичному Рінш-клапані



Розрахункова схема елементарної площі в полярній системі координат

Рівняння рівноваги

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0. \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \Rightarrow \frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}$$

Закон Гука

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] / E, \\ \varepsilon_\theta &= [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] / E, \\ \varepsilon_z &= [\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] / E, \end{aligned} \right.$$

Напруження

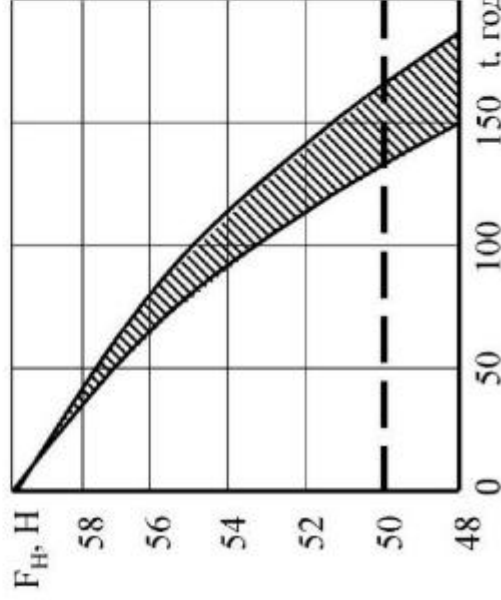
$$\sigma_\theta = \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (P_A - P)}{R_1^2 - R_2^2} \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_r = \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (P_A - P)}{R_1^2 - R_2^2} \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) + E\varepsilon_z = 2\nu \frac{PR_1^2 - P_A R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} + E\varepsilon_z$$

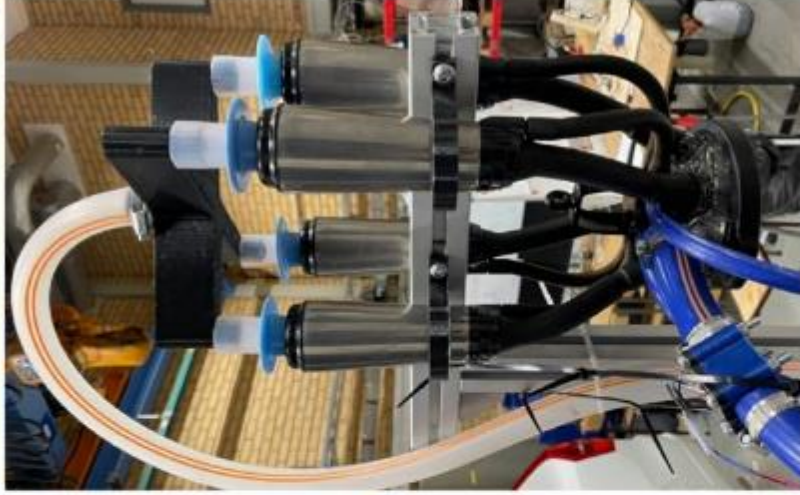
Старіння гуми можна апроксимувати експоненціальною залежністю динамічного модуля Юнга

$$E(t) = E_{\text{дк}} + (E_{\text{ок}} - E_{\text{дк}}) e^{kt}$$

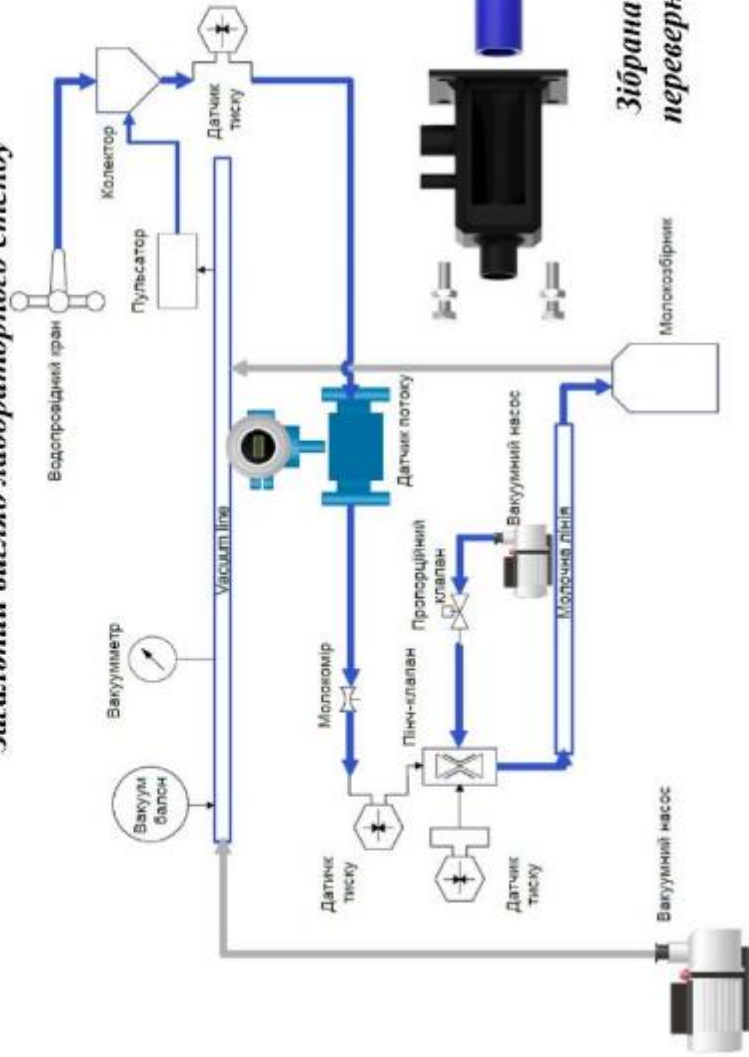


Графік залежності сили натягу рукава у пневматичному Рінш-клапані від тривалості його експлуатації

$$\begin{aligned} F_H &= \pi \nu (PR_1^2 - P_A R_2^2) \\ &- \frac{\pi E_z}{2} (R_2^2 - R_1^2) \times \\ &\times (E_{\text{ок}} + (E_{\text{ок}} - E_{\text{дк}}) e^{kt}) \end{aligned}$$



Загальний вигляд лабораторного стенду



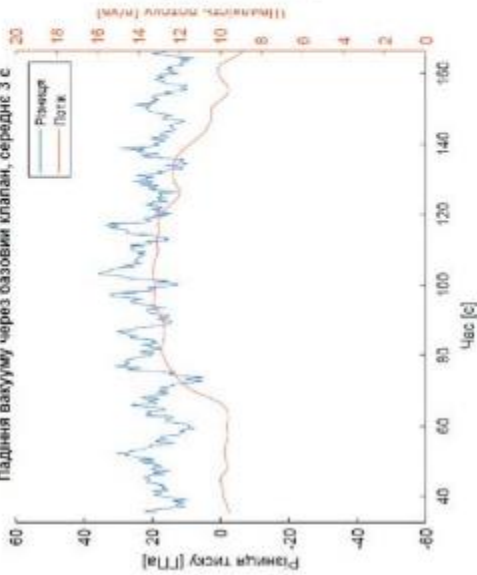
Зібрана САD-проект перевернутого Finch-кланана

Блок-схема лабораторного стенду для проведення дослідження

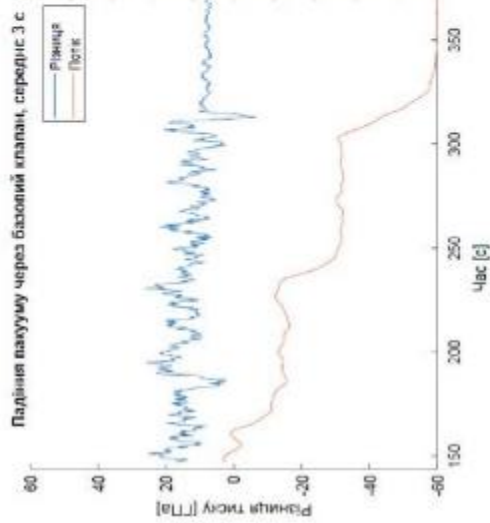
Результат експериментальних досліджень

7

Падіння вакууму через базовий клапан, середнє 3 с

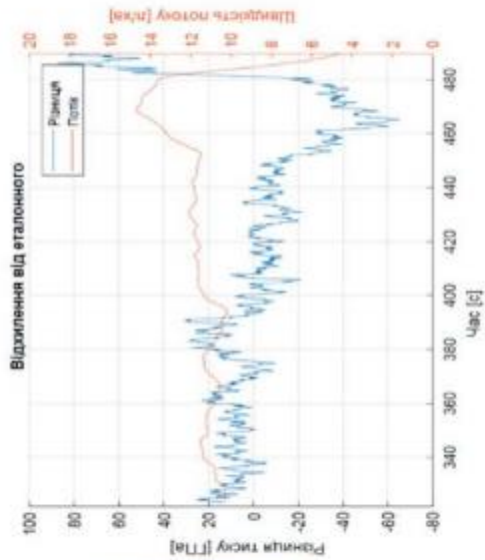


10–14 л/хв

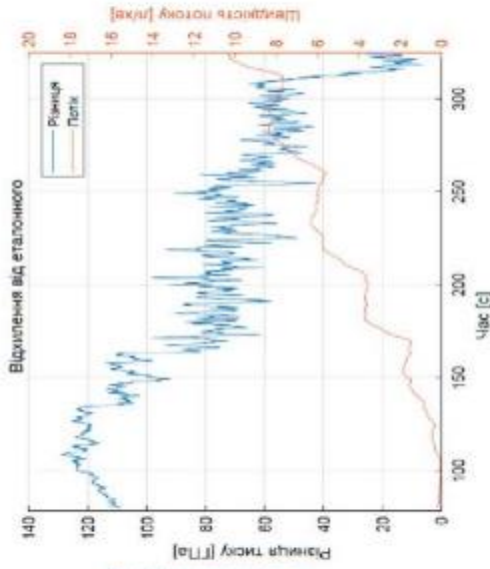


0–10 л/хв

Падіння тиску над базовим клапаном DeLaval

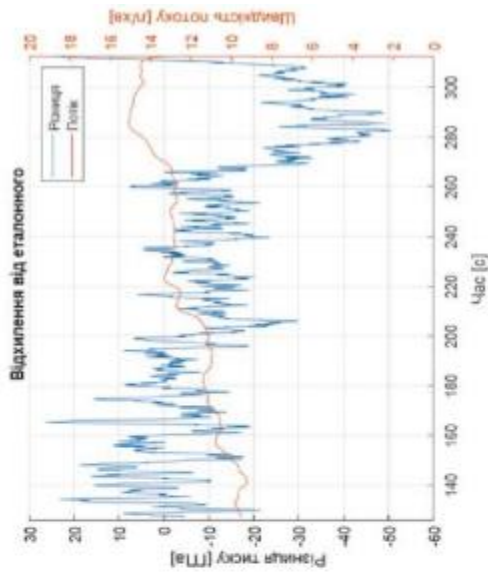


10–14 л/хв

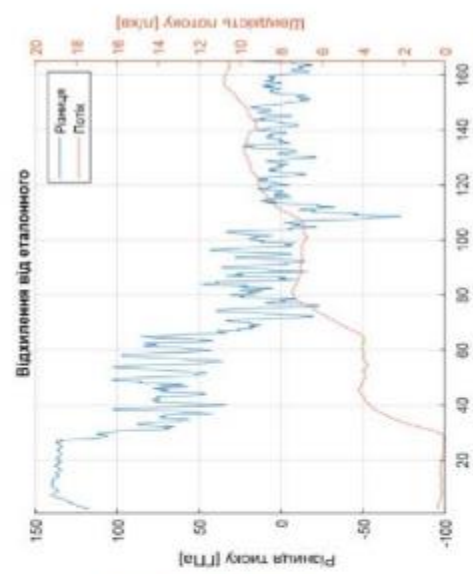


0–10 л/хв

Різниця тиску між вакуумом колектора та еталонним при відсутньому контролі і повністю відкритому клапану



10–14 л/хв



0–10 л/хв

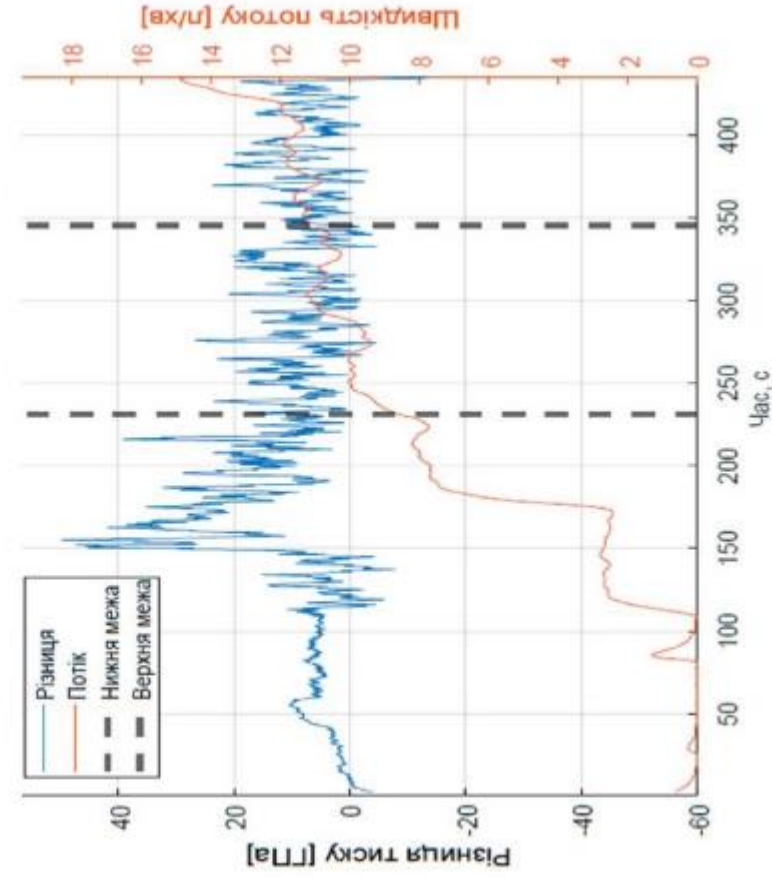
Падіння вакууму над Рінш-клапаном при наявності контролю

Результат експериментальних досліджень

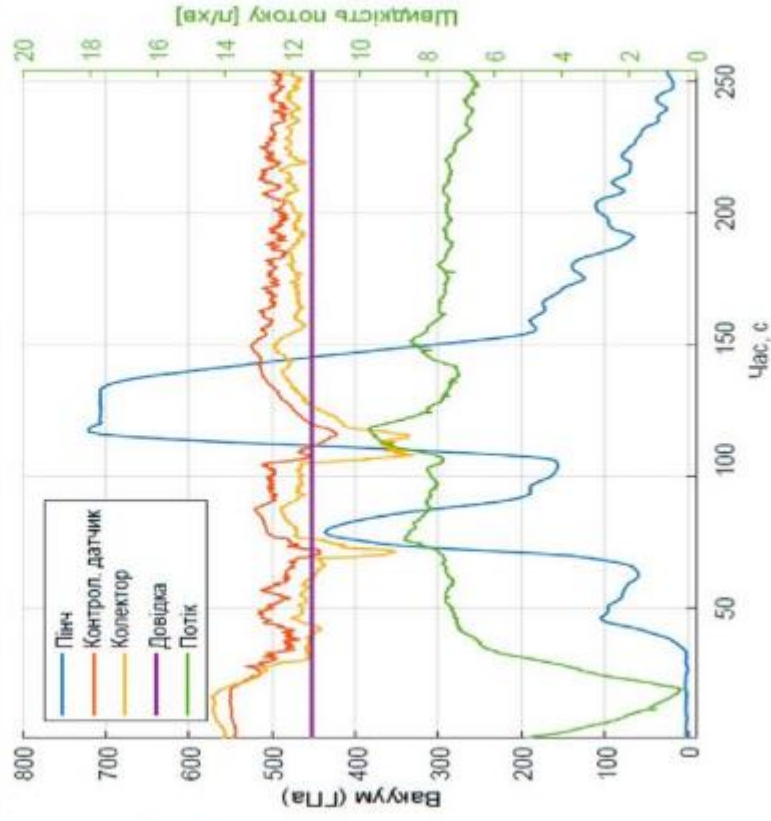
8

Робочий вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Макс. коливання [кПа]	Мін. коливання [кПа]
55	0-10	0,97	4,8	-7,7
55	10-14	0,79	2,6	-1,3

Робочий вакуум [кПа]	Швидкість потоку [л/с]	Середнє падіння вакууму [кПа]	Макс. коливання [кПа]	Мін. коливання [кПа]
55	0-8	1,9	12,2	-12,4



Падіння вакууму над Ріпш-клананом під час випробування для визначеного діапазону



Імітація ковзання одного з дойльних стаканів з постійним потоком 8 л/хв. Коротке ковзання через 75 секунд і довше ковзання через 110 секунд

Показник	Базовий апарат	Удосконалений апарат	Різниця
Витрати на оплату праці (грн/рік)	116800	116800	0
Амортизація (грн/рік)	800	1000	200
Загальні витрати (грн/рік)	117600	117800	200
Швидкість молоковіддачі (л/хв)	1,4	1,45	0,05
Додатковий обсяг молока (л/рік)	—	4380	4380
Додатковий дохід (грн/рік)	—	40734	40734
Додаткові капіталовкладення (грн)	—	1000	1000
Річний економічний ефект (грн)	—	39734	39734
Строк окупності (роки)	—	0,25	—

1. Дослідження стабілізації вакуумного режиму дойльних установок показують, що збільшення обсягу вакуумного балону або системи може підвищити продуктивність вакуумних насосів. Проте, ці підходи не повністю розкривають причини флуктуацій вакууму і не пропонують ефективних рішень для їх усунення. Нестабільність вакууму в дойльних установках обумовлена як технічними несправностями, так і принциповими особливостями системи доїння. Для забезпечення ефективного доїння і підтримання високої продуктивності корів необхідно забезпечити стабільність вакуумного режиму в дойльних установках. Оптиміальний вакуумний режим варіюється від 42 до 53 кПа, і його нестабільність може призвести до проблем з молоковіддачею, зниження жарності молока та загальної продуктивності. Урахування технічних характеристик вакуумних насосів та резерву повітря є критично важливим для підтримки постійного рівня вакууму і покращення якості молока.
2. Розглянуто вимоги до нового клапана відсічення та системи регулювання вакууму в дойльних установках. Зокрема, акцентовано увагу на необхідності мінімізації падіння вакууму через клапан, контролі за коливаннями вакууму при різних потоках молока, а також відповідності матеріалів нормам контактів з харчовими продуктами. Також підкреслено важливість модульної конструкції для обслуговування та тестування обладнання. Зокрема, для досягнення високої ефективності та надійності системи, всі технічні рішення повинні враховувати як стабільність вакууму, так і відповідність стандартам якості матеріалів.
3. Аналіз вакуумного падіння в молочній трубці показує, що вакуумне падіння залежить від кількох факторів, таких як об'ємний повітряний коефіцієнт, густина молока, довжина та діаметр трубки, швидкість потоку і коефіцієнти втраг. Падіння вакууму зростає зі збільшенням швидкості потоку, і його значення завжди буде ненульовим, незалежно від конструкції системи доїння. Вибір конструкції клапана залежить від його здатності уникати забруднень і підтримувати точність регулювання потоку. Pinch-клапани, діафрагмові клапани та вентиляльні клапани мають свої переваги і недоліки. Pinch-клапани, завдяки своїй конструкції, добре підходять для харчових застосувань, де важливо уникати мертвих об'ємів і забруднень. Під час роботи пневматичного Pinch-клапана важливо враховувати знос гумового рукава через пульсацію. Розрахунки показують, що термін служби гуми рукава є приблизно 160 годин, що відповідає технічній документації. З урахуванням умов експлуатації, рукав слід замінювати кожні 40 днів при регулярному використанні.
4. Результати показують, що можливо створити електронно-регульований вакуумний запірний клапан для дойльних систем. Завдяки впровадженню Pinch-клапана, керованого простим мікроконтролером, рівень вакууму в дойльному колекторі слідує за референтним сигналом, встановленим на 45 кПа, при витратах потоку від 6 до 12 л/хв з мінімальним падінням вакууму. Крім того, впровадивши деякі незначні вдосконалення та зміни, обговорені в попередніх розділах, можна буде розширити робочий діапазон і підвищити ефективність Pinch-клапана.
5. Удосконалений дойльний апарат забезпечує значний економічний ефект порівняно з базовим апаратом завдяки збільшенню швидкості молоковіддачі. Хоча річні витрати на амортизацію удосконаленого апарата вищі у порівнянні з базовим, додатковий дохід від продажу молока, який становить 40734 грн на рік, компенсує ці витрати. Строк окупності доопрацьованих апаратів становить приблизно 91 день.