

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 631.36

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

ЮХИМЕНКО Дарія Олегівна

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА КОНСТРУКЦІЇ КОЛЕКТОРА
ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

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

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Юхименко Д. О. **Удосконалення параметрів та конструкції колектора доїльного апарата.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

Кваліфікаційна робота спрямована на пошук раціональних конструкційних рішень колекторів доїльних апаратів, з цією метою встановлені основні переваги та недоліки відомих конструкцій. Намічено основні напрямки удосконалення колектора.

У кваліфікаційній роботі вирішене питання підвищення ефективності процесу машинного доїння корів за рахунок удосконалення конструкції та режимів роботи колектора. Розроблена конструкція клапанного механізму який дозволяє керувати розподілу тиску у порожнині молочної камери.

Виконано конструкційні та технологічні розрахунки розробленого клапанного механізму, виконано розрахунок елементів конструкції на міцність, проведена порівняльну оцінку серійного та удосконаленого колектора.

Ключові слова: корпус колектора, клапанний механізм, машинне доїння, мембрана клапана, якість молока.

ANNOTATION

Yukhymenko D. O. **Improvement of the parameters and design of the collector of the milking machine.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for obtaining a bachelor degree in specialty 208 – agricultural engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023

The qualification work is aimed at finding rational design solutions for collectors of milking machines, for this purpose, the main advantages and disadvantages of known designs are established. The main areas of improvement of the collector are outlined.

In the qualification work, the issue of increasing the efficiency of the process of machine milking of cows by improving the design and operating modes of the collector is solved. The design of the valve mechanism has been developed, which allows you to control the distribution of pressure in the cavity of the milk chamber.

Structural and technological calculations of the developed valve mechanism were performed, strength calculations of structural elements were performed, and a comparative assessment of the serial and improved collector was performed.

Key words: collector body, valve mechanism, machine milking, valve membrane, milk quality.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОЛЕКТОРІВ ДОЇЛЬНИХ АПАРАТІВ	7
1.1. Вимоги до доїльних апаратів та їх складових	7
1.2. Аналіз конструкцій колекторів доїльного апарата	8
Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОЛЕКТОРА ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА	14
2.1. Синтез удосконаленого колектора	14
2.2. Конструкційний та технологічний розрахунок удосконаленого колектора	17
2.3. Розрахунок на міцність елементів конструкції клапанного механізму	21
Висновки до розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО КОЛЕКТОРА ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА	26
3.1. Заходи технічної експлуатації удосконаленого колектора	26
3.2. Економічна оцінка розробки	28
Висновки до розділу 3	30
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33
ДОДАТКИ	35

ВСТУП

Актуальність теми. Доїння корів вважається важливим технологічним процесом, оскільки від його ефективності залежить не тільки повнота видоювання але і збереження здоров'я тварин. Тому, конструкції та технологічні режими роботи доїльних апаратів повинні відповідати встановленим зоотехнічним та зооветеринарним вимогам.

Основну функцію зі збирання молока від долей вимені корів та транспортування молока до доїльного відра чи у молокопровід виконує колектор доїльного апарата. Від ефективності роботи колектора залежить швидкість вивільнення молочної камери. Можливі затримки у виведенні молока від колектора спричиняють суттєві перепади тисків, що негативно впливає на процес доїння.

Для реалізації ефективного машинного доїння кормів провідні виробники доїльного обладнання пропонують власні конструкції колекторів доїльних апаратів. Так, для усунення можливого переповнення молокозбірної камери колектора молоком пропонується збільшувати її об'єм з 100 до 300 см³. Іншими рішеннями пропонується одночасно виводити молоко тільки із двох долей вимені – тобто реалізується попарний режим доїння. Таке рішення не призводить до ускладнення конструкції колектора доїльного апарата, а тільки вимагає змінити конструкцію камери розподілу змінного тиску до міжстінного простору доїльних стаканів. Одночасне виведення молока тільки із двох доїльних стаканів має вирішити проблему переповнення колектора молоком, але доїння високопродуктивних корів тимчасово, в період інтенсивної молоковіддачі, викликає незначні порушення вакуумного режиму роботи доїльного апарата.

Можна зробити висновок, що рішення спрямовані на реалізацію попарного доїння та збільшення об'єму молочної камери не усувають базової проблеми при доїнні високопродуктивних корів – переповнення молочної камери та спінювання молока. Так, при попарному доїнні при такті стиску в

передній парі доїльних стаканів реалізується такт ссання в задніх парах стаканів. У зв'язку із цим камера збору молока завжди буде заповненою, що не відповідає умові повного спорожнення. Тому виникає потреба у якісному виведенні молока протягом періоду доїння.

Таким чином, пошук конструкційного рішення колектора доїльного апарата із усуненням недоліків відомих конструкцій є актуальною проблемою яка потребує вирішення.

Мета і завдання. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності колектора доїльного апарата шляхом удосконалення його конструкції.

Для реалізації мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати оцінку зоотехнічних та зооветеринарних вимог до елементів доїльного апарата;
- виконати аналіз конструкцій серійних колекторів доїльного апарата, виявити їх переваги та недоліки, встановити напрями удосконалення;
- розробити конструкційно-технологічну схему колектора доїльного апарата із системою керування тиском у молочній камері та спрямуванням молока по дотичній до стінок колектора;
- визначити конструкційно-технологічні параметри розробленого клапанного механізму системи керування тиском;
- виконати розрахунок елементів кріплення розробленого клапанного механізму до корпусу колектора;
- розробити заходи технічної експлуатації та визначити економічну доцільність використання удосконаленого колектора.

Об'єкт досліджень – колектор доїльного апарата із системою керування тиску у молочній камері.

Предмет досліджень – параметри та режими роботи клапанного механізму керування тиском у колекторі доїльного апарата.

Методи досліджень. Вказані у кваліфікаційній роботі завдання вирішувалися шляхом використання основних положень та законів технічної

механіки, теорії машин та механізмів, теорії руху нестиснених середовищ та вакуумної техніки, використовувалися відомі аналітичні моделі встановлення параметрів елементів конструкцій. Деякі теоретичні дослідження виконували за допомогою програмного середовища Microsoft Excel, при використанні Microsoft Word.

Апробація результатів роботи. Результати кваліфікаційної роботи пройшли апробацію відповідно до вимог – доповідались на внутрішньовузівських та міжфакультетських конференціях, викладені у наступних друкованих працях:

1. Медведський О. В., Юхименко Д. О. Оцінка конструкційних особливостей колекторів доїльних апаратів. *Наукові читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 82–85.

2. Юхименко Д. О. Синтез удосконаленого колектора доїльного апарата. *Наукові читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Т. 3 С. 89–90.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота включає вступ, три розділи основної частини, загальні висновки, список використаних літературних джерел (20 найменувань), викладена на 34 сторінках комп'ютерного тексту.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОЛЕКТОРІВ ДОЇЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1. Вимоги до доїльних апаратів та їх складових

Доїльний апарат є основним виконавчим механізмом виведення утвореного у вимені корови молока. Для якісного виконання покладених завдань, елементи доїльного апарата повинні відповідати встановленим вимогам. [1-4]

Правилами машинного доїння корів встановлені наступні зоотехнічні вимоги до елементів доїльного апарата в цілому та колектора зокрема: [3-8]

- доїльний апарат повинен мати змінні режими роботи залежно від інтенсивності молоковіддачі;
- під час доїння має відбуватись стимуляція процесу молоковіддачі коровою для повного виведення утвореного молока, температура елементів доїльного апарата має відповідати фізіологічно необхідній;
- мають бути присутні елементи регулювання співвідношення тактів та частоти пульсації;
- дотримання безпеки для тварини під час доїння має бути основним, особливо для усунення можливого холостого доїння;
- необхідно усунути контакт рук людини із молоком для уникнення додаткового бактеріологічного забруднення молока;
- доцільно передбачити елементи обліку надоєного молока безпосередньо в конструкції доїльного апарата;
- доїльний апарат повинен мати засоби сигналізування про закінчення процесу доїння або мати пристрої автоматичного відключення доїльних стаканів та знімання їх з дійок корови;

- конструкція доїльного апарата повинна бути максимально простою з найменшим числом деталей, для забезпечення швидкого розбирання під час миття та технічного обслуговування;
- перехідні процеси повинні мати мінімальну тривалість, при цьому, перепади тиску у піддійковому та міжстінному просторах доїльного стакана мають відбуватись миттєво;
- пропускна спроможність молокопровідної системи доїльного апарата повинна відповідати максимальному значенню інтенсивності молоковіддачі;
- конструкція колектора повинна забезпечувати відсутність зворотного току молока до доїльних стаканів;
- режими роботи доїльного апарата (частота пульсації, співвідношення тактів, рівень вакуумметричного тиску) повинні автоматично пристосовуватись до умов доїння. [3-8]

Дотримання встановлених вимог убезпечить тварину від негативних наслідків впливу доїльного апарата під час машинного доїння корів.

1.2. Аналіз конструкцій колекторів доїльного апарата

Найбільшого поширення набули колектори із одночасним збиранням молока від усіх чотирьох долей вимені корови (рис. 1.1). Це, як правило, доїльні апарати які використовувалися традиційного на молочних фермах нашої країни. Основною перевагою такого колектора є його простота конструкції, що сприяє швидкому розбиранню під час обслуговування – миття, чищення, заміни ущільнень і т.д. [1-4]

Але поряд із перевагами існує суттєвий недолік – переповнення колектора молоком під час найбільш інтенсивної молоковіддачі. Особливо гостро цей недолік проявляється при доїнні на доїльних установках, обладнаних верхнім молокопроводом. При цьому виникають значні затримки потоку молока. Це, в свою чергу впливає на значні зміни вакуумметричного тиску у молокопровідній системі. Набір вказаних негативних факторів

призводить до погіршення якості молока, оскільки потік молока буде пульсуючим. [1-4]

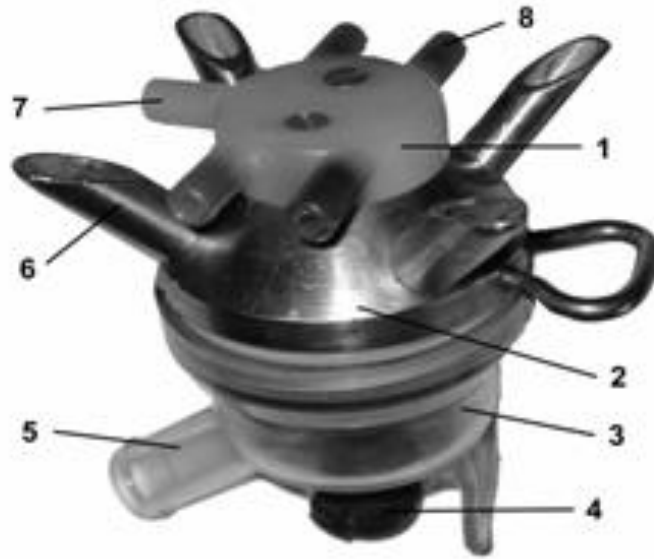


Рис. 1.1. Колектор доїльного апарата АДУ-1: 1 – розподільна кришка; 2 – металевий корпус; 3 – нижня частина корпусу; 4 – фіксатор; 5 – патрубок для відведення молока; 6 – патрубки молочних трубок; 7 – патрубок камери розподілу змінного тиску від пульсатора; 8 – патрубки камери розподілу змінного тиску до стаканів [7, 8]

Відомо, що під час пульсуючого потоку молока відбувається руйнування жирових кульок та осідання їх на поверхні молокопровідних елементів. Це приводить до значних втрат жирності молока та погіршення його технологічних властивостей. [9-13]

Для усунення недоліків колекторів доїльних апаратів із одночасним виведенням молока, провідні виробники доїльного обладнання пропонують використовувати доїльні апарати із попарним доїнням. Відповідно до такого режиму доїння молоко до молокозбірної камери колектора одночасно буде надходити тільки із двох доїльних стаканів (рис. 1.2). [9, 14]



Рис. 1.2. Підвісна частина доїльного апарата МС-31 (фірма DeLaval, Швеція): 1 – гільза стакану доїльного; 2 – корпус колектора; 3 – патрубки камери розподілу змінного тиску; 4 – патрубок для відведення молока [4, 9]

Колектор типу МС-31 має молочну камеру аналогічного розміру для колекторів із одночасним доїнням. За рахунок реалізації режиму попарного доїння ступінь заповнення молочної камери при одночасному надгодженні молока від двох долей вимені зменшується. В наслідок цього покращується режим транспортування молока молокопроводом. Але незначний об'єм молочної камери колектора не здатен повністю усунути ефект переповнення під час доїння високопродуктивних корів. В наслідок цього виникають небажані перепади тиску у просторах доїльних стаканів, що порушує стабільність процесу доїння. [4, 14]

Колектор доїльного апарата типу МС-50 (рис. 1.3) має збільшений об'єм молочної камери, порівняно із колектором типу МС-31, що гарантує усунення ефекту переповнення. Окрім цього застосована схема верхнього відбору молока

із молочної камери колектора. Це дозволяє усунути перепади тиску під час процесу транспортування молока до молокопроводу доїльної установки.



Рис. 1.3. Колектор типу 50 (фірма DeLaval, Швеція): 1 – корпус колектора; 2 – патрубок для відведення молока; 3 – патрубки камери розподілу змінного тиску; 4 – гільза стакану доїльного [14]

Вирішити проблему нерівномірності наповнення молоком молочної камери пропонує італійська фірма InterPuls шляхом використання додаткової вставки у верхній частині корпусу (рис. 1.4). [9]

В конструкції колектора доїльного апарата на рис. 1.4 використовується запатентоване фірмове рішення – обтічний дефлектор. Він знаходиться всередині колектора у верхній його частині в напрямку потоку молока від доїльних стаканів. Це запобігає падінню молока відразу в нижню чашу

колектора, змушуючи молоко стікати по стінках дефлектора та корпуса колектора. [9]

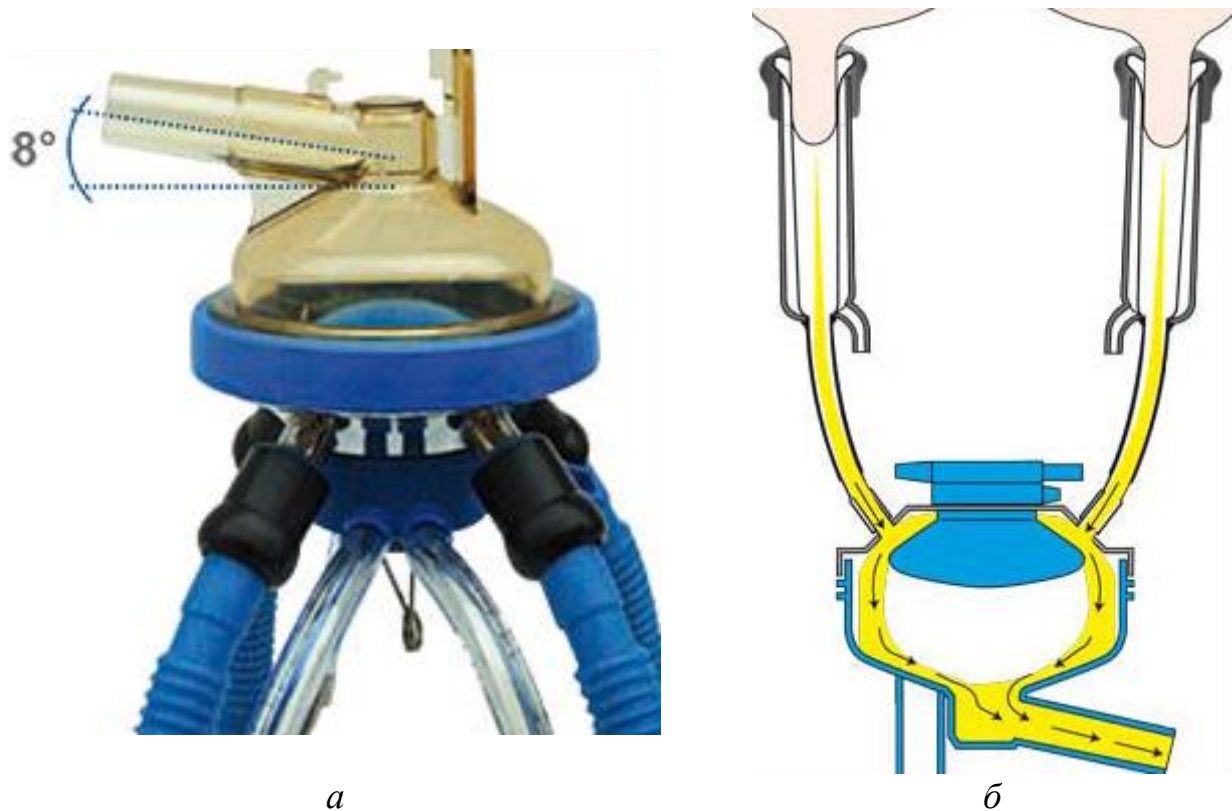


Рис. 1.4. Колектор доїльного апарата тип 450 (фірма InterPuls, Італія): *а* – загальний вигляд; *б* – схема роботи [9]

На думку фірми, таке рішення дозволяє усунути типові коливання вакууму, які присутні у колекторах звичайної конструкції. Тому, молоко не буде занадто спінюватись, що може покращить його якість. [9]

На нашу думку присутність додаткової вставки у формі дефлектора може мати деякі негативні прояви. В першу чергу це пряма перешкода потокові молока від доїльних стаканів. За умови інтенсивного потоку молоко буде вдарятись у дефлектор і змінювати свій напрямок не так полого як вказано на рис. 1.4. Найбільш ймовірно інтенсивний потік розділиться на декілька потоків за різними напрямками що може викликати додаткове збовтування молока. Окрім цього, незначна за розміром щілина для руху молока може впливати на прискорення потоку, що, також, відповідно до досліджень [10-13] може мати

негативні наслідки для якості молока, оскільки великі швидкості потоку сприяють руйнуванню жирових кульок.

У всіх розглянутих конструкціях колекторів в тій чи іншій формі присутнє збовтування молока в молочній камері та пульсація в шлангові при доїнні в верхній молокопровід, що веде до диспергування молочних часток. За рахунок цього отримуємо зниження якості молока. Збільшення ж швидкісного режиму виведення молока з колектора не покращує природну якість молока, а в деяких випадках погіршує. Отже, не одне із запропонованих конструкційних рішень не відповідає, в повній мірі, зоотехнічним вимогам.

Використовуючи вдалі рішення відомих виробників доїльного обладнання необхідно удосконалити колектор доїльного апарата таким чином, щоб виконувати технологічний процес машинного доїння із збереженням здоров'я корів та якісних показників видоєного молока.

Висновки до розділу 1

1. Доїння корів вважається важливим технологічним процесом, оскільки від його ефективності залежить не тільки повнота видоювання але і збереження здоров'я тварин. Тому, конструкції та технологічні режими роботи доїльних апаратів повинні відповідати зоотехнічним вимогам.

2. Основну функцію зі збирання молока від долей вимені корів та транспортування молока до доїльного відра чи у молокопровід виконує колектор доїльного апарата. Від ефективності роботи колектора залежить швидкість вивільнення молочної камери. Можливі затримки у виведенні молока від колектора спричиняють суттєві перепади тисків, що негативно впливає на процес доїння. Рішення спрямовані на реалізацію попарного доїння та збільшення об'єму молочної камери на усувають базової проблеми при доїнні високопродуктивних корів – переповнення молочної камери та спінювання молока.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ КОЛЕКТОРА ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА

2.1. Синтез удосконаленого колектора

Згадані проблеми можна вирішена двома шляхами. [15]

По-перше це зменшення втратування молока шляхом вдосконалення конструкції колектора.

По-друге, пришвидшити виведення молока з молочного шланга шляхом покращення режимних характеристик.

Потік молока через удосконалений колектор повинен бути рівномірним для виключення переповнення його молоком, що є основною задачею.

За рахунок цього мають мінімізуватись флуктуації вакууму під дією, що також, приведе до зниження ризику погіршення якості молока.

Позбутися вказаних недоліків колекторів доїльних апаратів можна шляхом втілення в одній конструкції позитивних особливостей існуючих серійних зразків. Зокрема, колектора фірма InterPuls, яка спробувала вирішити проблему шляхом штучного спрямування потоку молока від молочних трубок до дефлектора-вставки, що запобігає збиранню молока в одному місці. Більш раціональним має бути рішення, яке не використовує додаткових елементів у порожнині корпусу або молочної камери колектора.

В конструкції удосконаленого колектора доїльного апарата має поєднуватись позитивні ознаки відомих серійних конструкцій передових світових виробників доїльного обладнання.

Структурна схема та принцип функціонування удосконаленого колектора доїльного апарата наведено на рис. 2.1. Так, питання покращення транспортування молока молочним шлангом можна вирішити шляхом створення додаткового тиску під час такту стиску. З цією метою необхідно поєднати камеру розподілу змінного тиску із порожниною молочної камери колектора. [15]

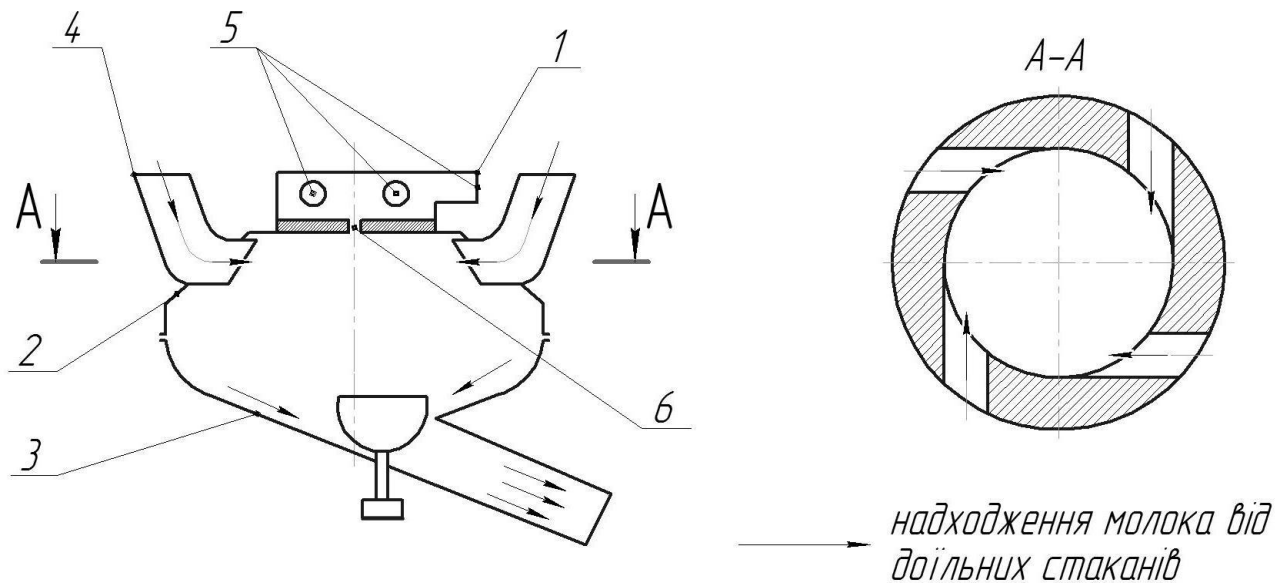


Рис. 2.1. Схема конструкції розробленого колектора: 1 – камера розподілу змінного тиску; 2 – корпус колектора; 3 – камера для збирання молока; 4 – патрубки молочних трубок; 5 – патрубки камери розподілу змінного тиску; 6 – отвір сполучний [15]

Для зниження ефекту спінування та неконтрольованого падіння молока на дно молочної камери у кваліфікаційній роботі пропонується змінити напрям надходження молока до колектора. Відповідно до рис. 2.1, молоко у молочну камеру колектора надходить по дотичній до його корпусу, або, іншими словами, тангенціально. За такої організації потоку молока, воно не скупчується в одному місці, а по стінкам молочної камери стікає до молочного шланга й далі до відра або молокопроводу. Оскільки порції молока від кожного доїльного стакана начебто омивають молочну камеру колектора, залишається достатньо вільного простору, а це позитивно відображається на стабільності вакуумметричного тиску у молокопроводі. В такому випадку потік молока не буде збурюватись, внаслідок чого не буде спінування молока та надмірних ударних навантажень, що виключить розшаровування молока, тобто, виключиться чинник впливу на якість молока. [15]

З метою покращення умов транспортування молока по молочному шлангу до молокопровода чи доїльного відра до молочної камери необхідно забезпечити надходження атмосферного тиску. Для цього ми пропонуємо сполучити розподільну та молочну камери колектора сполучним отвором 6 (рис. 2.2).

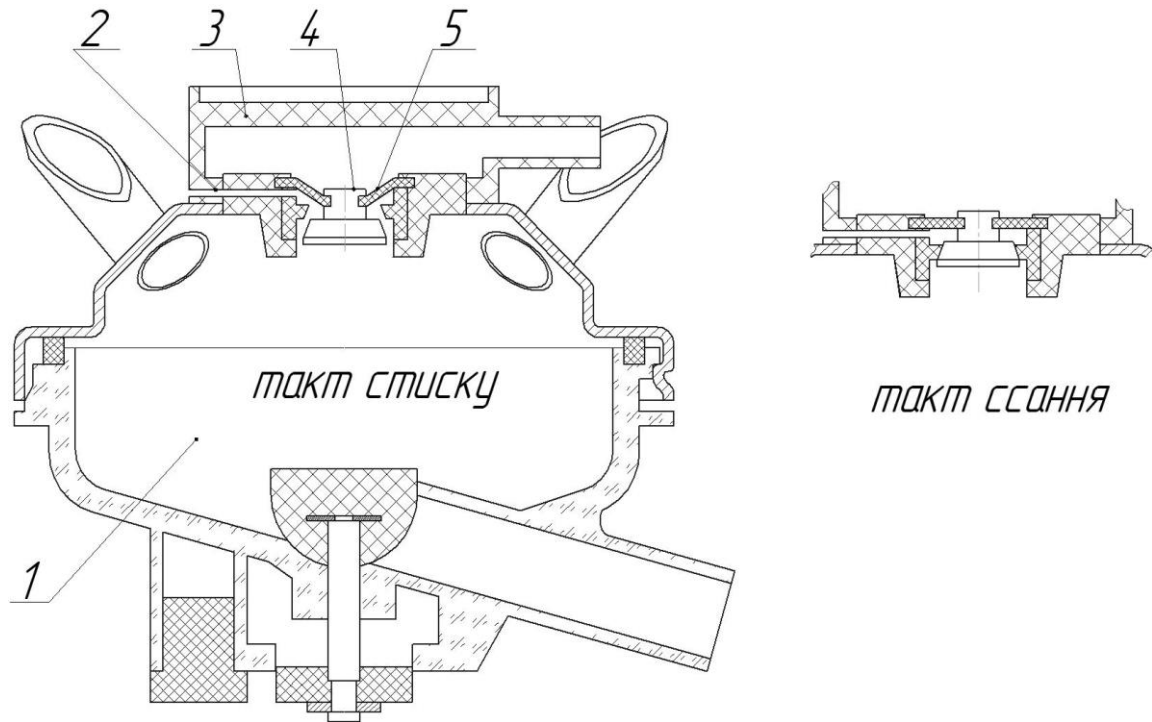


Рис. 2.2. Конструкційна схема удосконаленого колектора: 1 – корпус» 2 – сполучний канал; 3 – камера розподілу змінного тиску; 4 – клапан; 5 - мембрана

Під час такту стиску повітря із розподільної камери через дросельний канал буде надходити до молочної камери колектора. В наслідок цього у молочній камері виникне надмірний тиск, який буде сприяти кращому спорожненню молочної камери від порцій молока попереднього такту ссання. За наступного такту ссання, молочна камера буде порожньою, а тому не буде перешкод руху новим порціям молока до молочного шланга і далі до молокопровода. Окрім цього, зниження вакуумметричного тиску у піддійковому просторі доїльних стаканів забезпечить ефект відпочинку дійок тварини від вакууму.

2.2. Конструкційний та технологічний розрахунок удосконаленого колектора

Розрахунок клапанного механізму.

Для покращення повноти спорожнення молочної камери колектора та транспортування молока до молочного шланга через сполучний отвір до камери молочної колектора надходить повітря під час такту стиску. Для того, щоб повітря надходило тільки під час такту стиску необхідно обмежити його надходження протягом такту виведення молока. З цією метою нами пропонується використовувати наново розроблений клапанний механізм, схема функціонування якого наведена на рис. 2.3.

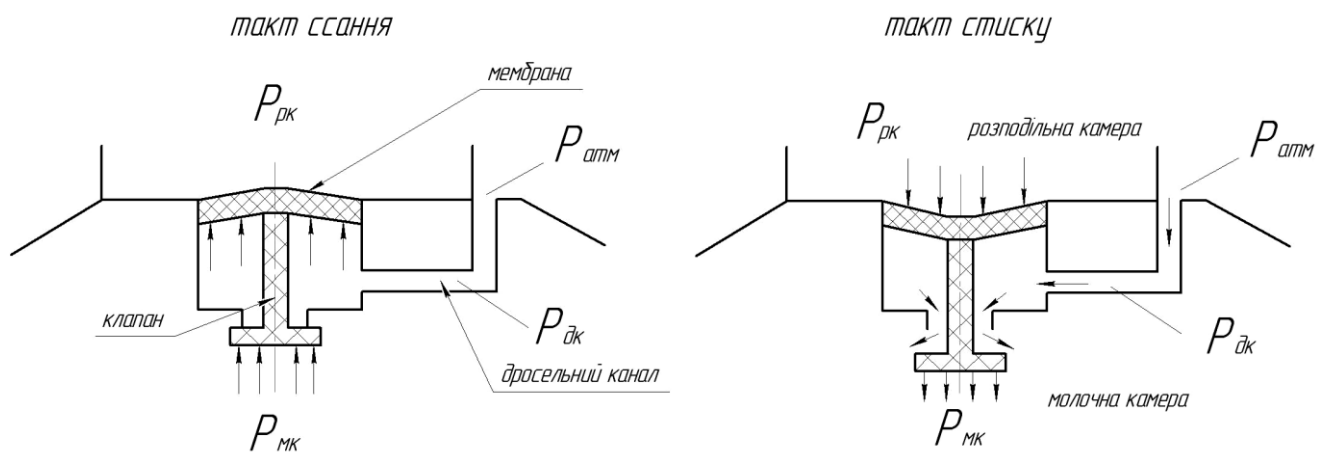


Рис. 2.3. Схема до розрахунку роботи розробленого клапанного механізму

Принцип роботи полягає в наступному. Під час такту стиску з боку камери розподілу змінного тиску колектора на мембрану діє атмосферний тиск. Внаслідок цього мембрана прогинається донизу та відкриває клапан. Через сполучний отвір, з'єднувальний та канал відкритий клапан повітря надходить до молочної камери колектора.

Розрахунок параметрів клапанного механізму під час такту всмоктування виконуємо у наступній послідовності.

На клапан (рис. 2.3) будуть діяти тиски що притискають його до сідла. Тиск $P_{\text{дк}}$ під мембраною, рівний атмосферному тиску $P_{\text{атм}}$, тиск над мембраною $P_{\text{рк}}$, рівний тиску в розподільній камері колектора та тиск $P_{\text{мк}}$, що діє з боку молочної камери, забезпечують закривання або відкривання клапан.

Сил дії цих тисків можна визначити за допомогою формули: [16-17]

$$F_{\text{кл}} = P_{\text{мк}} \cdot S_{\text{кл}}, \quad (2.1)$$

$$F_{\text{м}} = P_{\text{дк}} \cdot S_{\text{мб}}, \quad (2.2)$$

де $S_{\text{кл}}$ – площа клапана, конструкційно відповідно до параметрів серійного колектора приймемо рівною $S_{\text{кл}}=0,000113 \text{ м}^2$;

$S_{\text{мб}}$ – площа мембрани, конструкційно відповідно до параметрів серійного колектора приймемо рівним $S_{\text{мб}}=0,000201 \text{ м}^2$;

$P_{\text{дк}}$ – тиск в сполучному каналі, під час такту ссання абсолютний тиск відповідає атмосферному тиску, $P_{\text{мк}}=101,325 \text{ кПа}$;

$P_{\text{мк}}$ – абсолютний тиск під клапаном у молочній камері колектора відповідає вакуумметричному тиску, $P_{\text{мк}}=52 \text{ кПа}$.

Підставимо дані, отримаємо:

$$F_{\text{кл}} = 52 \cdot 0,000113 = 0,0058 \text{ кН},$$

$$F_{\text{м}} = 101,325 \cdot 0,000201 = 0,0204 \text{ кН}.$$

Сила, що опускає клапан залежить від тиску в просторі над клапаном та сили пружності мембрани, оскільки вона прагне випрямитись.

Сила яка прагне опустити клапан під дією тиску $P_{\text{дк}}$: [16-19]

$$F_{\text{дк}} = P_{\text{дк}} \cdot S_{\text{кл}}, \quad (2.3)$$

$$F_{\text{дк}} = 101,325 \cdot 0,000113 = 0,00114 \text{ кН}.$$

Сила пружності мембрани протистоїть силі що її вигинає доверху: [1, 7, 16-19]

$$F_{\text{мб}} = F_{\text{дк}} \cdot \lambda, \quad (2.4)$$

де λ – коефіцієнт, що враховує пружні властивості мембрани: [1, 7, 16-19]

$$\lambda = \frac{\frac{1}{3} + \frac{d_{\kappa}}{d_{\text{мб}}} + \left(\frac{d_{\kappa}}{d_{\text{мб}}}\right)^2}{1 + \frac{2d_{\kappa}}{d_{\text{мб}}} + \left(\frac{d_{\kappa}}{d_{\text{мб}}}\right)^2}, \quad (2.5)$$

де $d_{\text{кл}}$, $d_{\text{мб}}$ – відповідно діаметр клапана та мембрани, прийmemo конструкційно $d_{\text{кл}}=0,012$ м, $d_{\text{мб}}=0,016$ м.

$$\lambda = \frac{\frac{1}{3} + \frac{0,012}{0,0016} + \left(\frac{0,012}{0,016}\right)^2}{1 + \frac{2 \cdot 0,012}{0,016} + \left(\frac{0,012}{0,016}\right)^2} = 0,536.$$

Тоді:

$$F_{\text{мб}} = 0,00114 \cdot 0,536 = 0,0061 \text{ кН}.$$

Сила яка утримує клапан закритим визначають із рівняння рівноваги, отримуємо: [16-19]

$$F_{\text{зк}} = F_{\text{кл}} + F_{\text{м}} - F_{\text{дк}} - F_{\text{мб}}, \quad (2.6)$$

$$F_{\text{зк}} = 0,0058 + 0,0204 - 0,00114 - 0,0061 = 0,019 \text{ кН}.$$

Отже, сила що притискає клапан до сідла має величину вищу від нуля. В такому випадку клапан буде закритий.

Розрахунок параметрів клапанного механізму під час такту стиску виконуємо у наступній послідовності.

Під час такту стиску (рис. 2.3) в камера розподілу змінного тиску колектора змінюється тиск з вакуумметричного на атмосферний, тобто $P_{\text{рк}}=101,325$ кПа. В об'ємі під клапаном в початковий момент часу тиск залишається незмінним $P_{\text{мк}}=52$ кПа. Сила що діє на клапан зсередини також залишається незмінною, тобто, залежить від тиску $P_{\text{дк}}$.

Сила з якою прогинається донизу мембрана становить:

$$F_{\text{нк}} = P_{\text{рк}} \cdot S_{\text{мб}}, \quad (2.7)$$

$$F_{\text{нк}} = 101,325 \cdot 0,000201 = 0,0204 \text{ кН}.$$

Сумарну силу що опускає клапан визначають із рівняння рівноваги діючих сил:

$$F_{нк} = F_{нк} + F_{ок} + F_{кл} - F_{м} - F_{мб}, \quad (2.8)$$

$$F_{нк} = 0,0204 + 0,00114 + 0,0058 - 0,0204 - 0,0061 = 0,001 \text{ кН}$$

Таким чином, клапан відкриється й тиск під мембраною, через деякий проміжок часу, зміниться на атмосферний. Атмосферний тиск поступово через сполучний канал пошириться у камеру молочну колектора, знизивши рівень вакууму у підбійковому просторі доїльних стаканів, створює додатковий підпір порції молока, пришвидшуючи її транспортування до молокопроводу.

Підсмоктування повітря через сполучний канал припиняється коли у камері розподілу тисків колектора, та, відповідно, і над мембраною, буде вакуумметричний тиск. Це відбудеться коли настане час такту ссання. Як тільки це відбудеться – клапан під дією пружних сил мембрани та тиску $P_{рк}$ закриється.

Сила що закриє клапан визначається за допомогою складеного на основі діючих сил рівняння рівноваги:

$$F_{зкл} = F_{м} - F_{ок} - F_{кл} - F_{мб}, \quad (2.9)$$

$$F_{зкл} = 0,0204 - 0,00114 - 0,0058 - 0,0068 = 0,013 \text{ кН}.$$

В просторі під мембраною та над клапаном буде зберігатись атмосферний тиск, але за рахунок різниці площ клапана та мембрани, а також наявності вакууму над мембраною, клапан під час такту ссання буде перебувати у закритому положенні.

Розрахунок сполучного каналу.

Тривалість процесу зміни тисків у просторі над мембраною становить:
[16-19]

$$t = \frac{V}{76 \cdot k_p} \ln \psi \frac{P_{рк}}{P_{ок}}, \quad (2.10)$$

де V – об'єм простору над мембраною, $V=1,2 \text{ см}^3$;

ψ – коефіцієнт впливу часу, залежить від тисків;

k_p – коефіцієнт Пуазейля: [16-19]

$$k_p = \frac{\pi \cdot d_o^2}{128 \cdot l_o \cdot \eta_s}, \quad (2.11)$$

де d_o – діаметр сполучного каналу, $d_o=0,2$ см;

l_o – довжина сполучного каналу, $l_o=1,5$ см;

η_s – динамічна в'язкість повітря, $\eta_s=18,1 \times 10^{-6}$ Па \times с [17]

$$k_p = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{128 \cdot 1,5 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}} = 1,084.$$

Коефіцієнт впливу часу залежно від тисків (ψ) визначається з врахування абсолютних значень тисків у момент перемикання клапана (значення тисків у мм.рт.ст): [16-19]

$$\psi = \frac{152 - P_{\text{дк}}}{152 - P_{\text{мк}}}, \quad (2.12)$$

$$\psi = \frac{152 - 760}{152 - 400} = 2,45.$$

Отже:

$$t = \frac{1,2}{76 \cdot 1,084} \ln 2,45 \frac{52}{101,325} = 0,006 \text{ с.}$$

Отже, тривалість перемикання клапана становить лише 0,006 с. Оскільки тривалість такту стиску становить 0,167 с, то до молочної камери повітря буде надходити впродовж 0,161 с.

2.3. Розрахунок на міцність елементів конструкції клапанного механізму

Камера розподілу змінного тиску, а також корпус розробленого клапанного механізму кріпиться до корпусу колектора за допомогою гвинтового з'єднання (рис. 2.4).

Гвинтове з'єднання під час поєднання елементів працює на деформацію розтягування. [20]

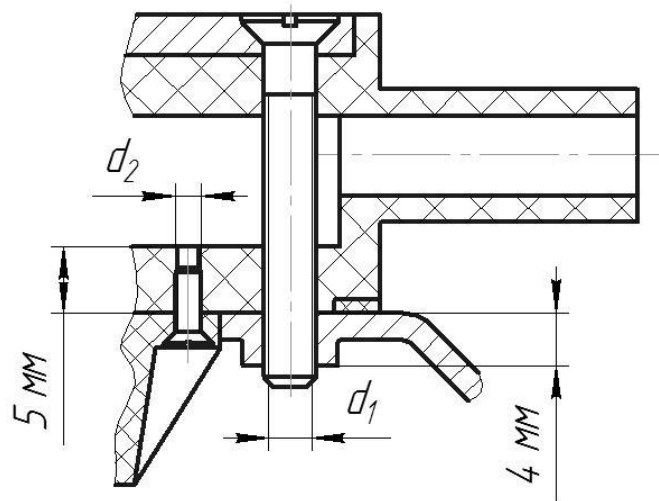


Рис. 2.4. Схема до розрахунку різьбового з'єднання.

Умова міцності гвинта на розтягування має вигляд:

$$\sigma_p = \frac{4F}{\pi \cdot d_1^2} \leq [\sigma_p], \quad (2.13)$$

де F – сила, що діє на стрижень гвинта, Н;

d_1 – внутрішній діаметр гвинта, мм;

$[\sigma_p]$ – допустиме напруження розтягування, для сталі марки Сталь 35 $[\sigma_p]=125 \text{ Н/мм}^2$ [20].

Сила яка прагне розтягнути стержень гвинта становить вагу молока у молокозбірній камері колектора за один такт ссання та вагу підвісної частини доїльного апарата.

Встановити значення сили можна за залежністю: [19]

$$F = m_m \cdot g \cdot m_{\text{д.а.}} / i, \quad (2.14)$$

де m_m – кількість молока яке надходить до колектора за один такт ссання, $m_m=0,061 \text{ кг}$; [1-3]

$m_{\text{д.а.}}$ – вага підвісної частини доїльного апарата, $m_{\text{д.а.}}=2,4 \text{ кг}$; [1-3]

i – кількість гвинтів, $i=2$ шт;

g – прискорення земного тяжіння, $g=9,81$ м/с². [19]

$$F = 0,061 \cdot 9,81 \cdot 2,4 / 2 = 0,72 \text{ Н}.$$

Із залежності (2.13) визначаємо внутрішній діаметр гвинта:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F}{\pi \cdot [\sigma_p]}}, \quad (2.15)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,72}{3,14 \cdot 125}} = 0,085 \text{ мм}.$$

Орієнтовне значення зовнішнього діаметру визначають за емпіричною залежністю: [20]

$$d' = 1,2 \cdot d_1, \quad (2.16)$$

$$d' = 1,2 \cdot 0,085 = 0,102 \text{ мм}.$$

З конструктивних міркувань зовнішній діаметр двох гвинтів приймемо рівним 4 мм.

Оскільки кришка колектора з'єднується за допомогою різьбового з'єднання із камерою розподілу змінного тиску колектора, яка виготовлена із пластмаси, виникає необхідність у визначенні висоти різьби. Для цього виконаємо перевірку різьби на зріз під дією існуючого навантаження.

Висоту різьби визначимо за формулою: [20]

$$h = \frac{F}{0,8 \cdot \pi \cdot d \cdot [\tau_{зр}]}, \quad (2.17)$$

де d – зовнішній діаметр гвинта, $d=4$ мм;

$[\tau_{зр}]$ – допустимі напруження на зріз, для сталі 12ХН3 $[\tau_{зр}]=115$ Н/мм² [20].

$$h = \frac{0,72}{0,8 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 115} = 0,014 \text{ мм}$$

Відповідно до рекомендацій [20], $h=0,52d'=0,52 \times 0,102=0,05$ мм, приймемо товщину різьбової частини кришки корпусу колектора на рівним 4 мм, що цілком достатньо, виходячи із умови міцності.

Перевіримо на міцність різьбове з'єднання корпусу клапанного механізму до камера розподілу змінного тиску колектора.

Напруження на руйнування різьби мають відповідати умові: [20]

$$\tau_{зр2} = \frac{F_2}{0,8 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot h_2} \leq [\tau_{зр2}], \quad (2.18)$$

де d_2 – зовнішній діаметр гвинта, $d_2=2\text{мм}$;

$[\tau_{зр2}]$ – допустимі напруження на зріз, для амінопластів $[\tau_{зр2}]=12 \text{ Н/мм}^2$ [20];

h_2 – висота різьбової частини, $h_2=5\text{мм}$ (див. рис. 2.4);

F_2 – сила, що діє на гвинт, Н:

$$F_2 = F_{нк} / i_2, \quad (2.19)$$

де i_2 – кількість гвинтів з діаметром d_2 , $i_2=4\text{шт}$;

$F_{нк}$ – сила, що діє на гвинти, $F_{нк}=1 \text{ Н}$.

$$F_2 = 1 / 4 = 0,25 \text{ Н}.$$

Тоді:

$$\tau_{зр2} = \frac{0,25}{0,8 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 5} = 0,02 \text{ Н / мм}^2.$$

Отже, умова міцності (2.18) виконується, а це означає що параметри різьбового з'єднання обрані правильно.

Висновки до розділу 2

1. Запропонована конструкція удосконаленого колектора доїльного апарата поєднала в собі позитивні ознаки серійного обладнання відомих світових виробників. Питання покращення транспортування молока молочним шлангом пропонується вирішити шляхом створення додаткового тиску у молочній камері під час такту стиску. З цією метою камеру розподілу змінного тиску поєднали із порожниною молочної камери колектора за допомогою розробленого клапанного механізму.

2. Ефект спінювання молока в удосконаленому колекторі усувається за рахунок зміни напрямку надходження молока до колектора. Так, молоко у молочну камеру колектора надходить по дотичній до його корпусу, що усуває проблему надмірного скупчення. За такої організації потоку молока, воно по стінкам молочної камери стікає до молочного шланга й далі до відра або молокопроводу.

3. Виконано розрахунок режимів роботи клапанного механізму під час такту ссання та під час такту стиску. Встановлено, що тривалість повного відкривання чи закривання клапана становить лише 0,006 с, тому до молочної камери повітря через сполучний канал буде надходити впродовж 0,161 с.

РОЗДІЛ 3

ВСТАНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
УДОСКОНАЛЕНОГО КОЛЕКТОРА ДОЇЛЬНОГО АПАРАТА

3.1. Заходи технічної експлуатації удосконаленого колектора

Удосконалений у кваліфікаційній роботі колектор (рис. 3.1) доїльного апарата поєднав у собі здатність ефективно вивільняти молочну камеру без ознак спінювання молока. Це досягається за рахунок створення додаткового перепаду тиску у молочній камері колектора під час такту стиску.

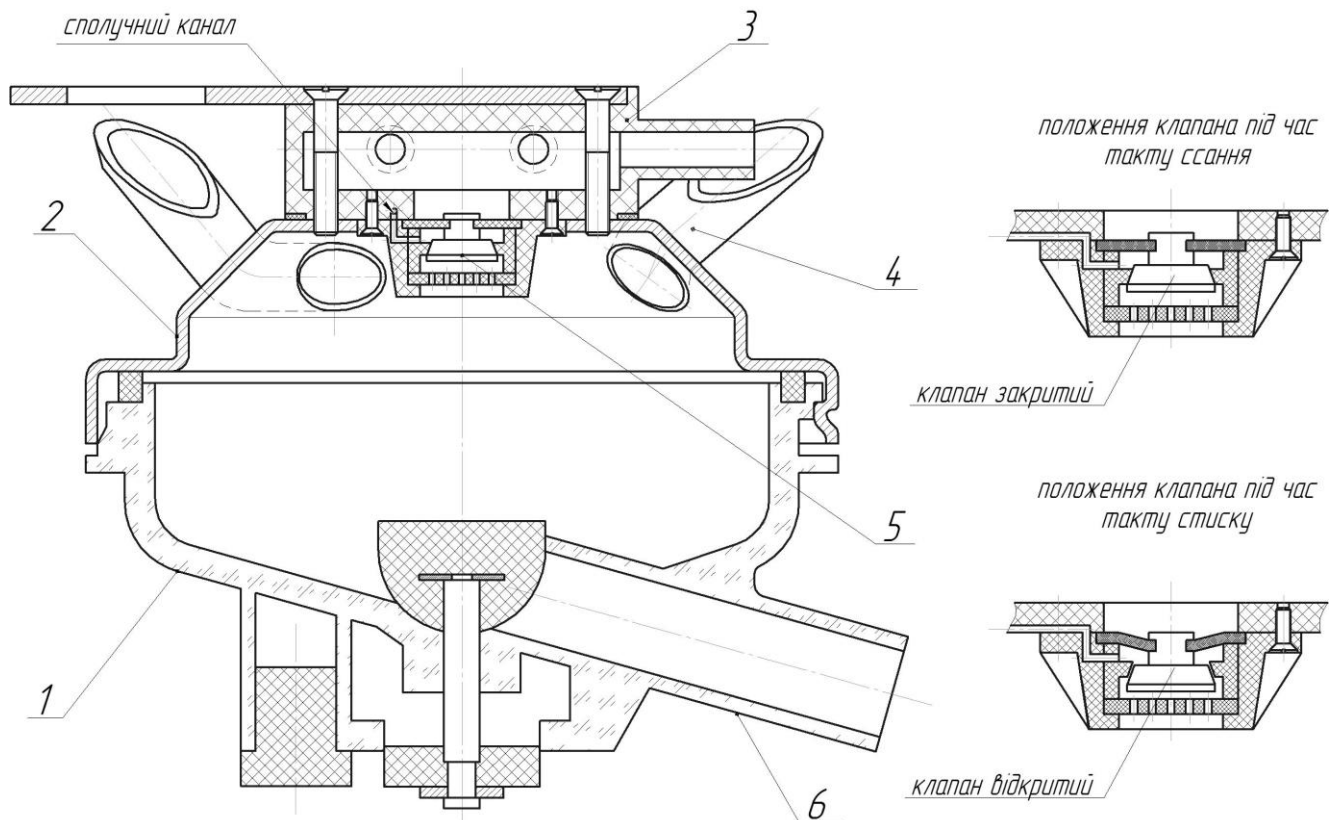


Рис. 3.1. Удосконалений колектор доїльного апарата: 1 – корпус прозорий молокозбірної камери; 2 – корпус металевий; 3 – камера розподілу змінного тиску; 4 – патрубок з вигином молочної трубки; 5 – клапан з мембраною; 6 – відвідний патрубок молока

Покращення режиму наповнення колектора молоком досягається за рахунок використання розробленої у кваліфікаційній роботі схеми надходження молока по дотичній до стінок молочної камери та механізм дозованого впуску повітря для інтенсифікації транспортування молока. Для цього використали патрубок 4 (рис. 3.1) з тангеційним вигином для з'єднання із молочною трубою доїльного стакана. За такої організації потоку молока, воно не скупчується в одному місці, а по стінкам молочної камери стікає до молочного шланга й далі до відра або молокопроводу.

Оскільки порції молока від кожного доїльного стакана начебто омивають молокозбірну камеру колектора, залишається достатньо вільного простору, а це позитивно відображається на стабільності вакуумметричного тиску у під час машинного доїння корів. В такому випадку потік молока не буде збурюватись, в наслідок чого не буде спінювання молока та надмірних ударних навантажень, що покращить якість молока в цілому.

Під час такту стиску клапан відкривається і повітря із зовні через сполучний канал буде надходити до молокозбірної камери колектора. В наслідок цього виникне надмірний тиск, який буде сприяти кращому спорожненню від порцій молока, яке надійшло від доїльних стаканів впродовж дії попереднього такту ссання. Окрім цього, зниження вакуумметричного тиску у піддійковому просторі доїльних стаканів забезпечить ефект відпочинку дійок тварини від вакууму.

При використанні удосконаленого колектора доїльного апарата необхідно керуватись загальними правилами які використовують для серійних доїльних апаратів. В першу чергу це сурове дотримання правил машинного доїння, оскільки від цього залежить збереженість здоров'я тварин. Перед початком роботи необхідно переконатись у повнокомплектності колектора, відсутності пошкоджень. Перевірити цілісність повітряних та молочних трубопроводних систем. Виявлені недоліки необхідно негайно усунути. Після чергового циклу машинного доїння доїльний апарат в цілому промивається спочатку мийним

розчином а потім теплою водою. Що стосується колектора, він має бути очищений від зовнішніх забруднень.

Розбирати та очищати внутрішні поверхні потрібно під час чергового регламентного технічного обслуговування доїльного апарата. При цьому слід звернути увагу на додаткові операції з обслуговування клапанного механізму. При розбиранні колектора необхідно розібрати клапанний механізм, очистити його складові та переконатись у їх цілісності та дієвості. Після цього зібрати із дотриманням фіксованих положень для забезпечення безперешкодного функціонування сполучного каналу.

3.2. Економічна оцінка розробки

Встановимо доцільність використання удосконаленого колектора шляхом виконання порівняльного аналізу із прототипом – колектор який не обладнано клапанним пристроєм. При цьому будемо використовувати загальноприйняті методики [5, 6] встановлення експлуатаційних видатків та можливого економічного ефекту за рахунок підвищення експлуатаційної ефективності.

При використанні прототипу приймемо надій молока на одну корову на рівні 5800 кг/гол. Так як удосконалений колектор покращує повноту виведення молока з молочної камери, забезпечує надійне транспортування молока з одночасним зниженням вакууму у піддійковому просторі доїльних стаканів, то можна розраховувати на зростання продуктивності тварин (на 3-9 %) за рахунок стабільності вакуумметричного тиску та більш повного виведення молока з вимені корови. Отже, за умови використання удосконалень, річна продуктивність корів може зрости до 6000 кг/гол.

Окрім збільшення продуктивності корів може спостерігатись позитивний ефект покращення здоров'я тварин за рахунок зниження навантаження на дійки під час такту стиску шляхом зниження рівня вакуумметричного тиску під

дійками. Також варто звернути увагу на те, що молоко не буде пінитись, а це сприяє збереженню його якісних показників.

За результатами проведених розрахунків отримали набір даних, які зведені у таблицю 3.1. В якості прототипу використаємо доїльний апарат вітчизняного виробництва фірми ПроТек (м. Харків).

Таблиця 3.1

Експлуатаційна ефективність удосконаленого колектора доїльного апарата

Показник	Колектор	
	серійний	удосконалений
Тип доїльного апарата	двотактний	двотактний
Рівень вакуумметричного тиску, кПа	48	48
Частота пульсації, хв ⁻¹	67±5	65±5
Витрата повітря, м ³ /год:		
всього	2,7	3,2
колектором	0,3-0,6	0,8-2,2
Балансова вартість, грн	7995	8104,8
Тривалість роботи, год/рік	101,39	101,39
Продуктивність корови, кг/рік	5800	6000
Експлуатаційні видатки, грн/кг	0,243	0,238
Річний економічний ефект, грн	-	996
Строк окупності, років	-	0,13

Відповідно до отриманих розрахунків, при використанні удосконаленого колектора можна отримати річну економію коштів у розмірі 996 грн з розрахунку на експлуатацію одного доїльного апарата. За умови використання на фермі у 600 корів кількість доїльних апаратів які приймають участь у технологічному процесі машинного доїння корів зростає.

Так, відповідно до вимог завантаженості на фермі використовується три доїльні установки типу «Ялинка» із загальною кількістю доїльних апаратів – 48 шт. Таким чином, з розрахунку на тваринницьке підприємство потужність 600 корів, використання удосконаленого колектора дозволить отримати 47808 грн річної економії коштів.

Висновки до розділу 3

1. Під час експлуатації удосконаленого колектора доїльного апарата необхідно керуватись загальними правилами що стосуються використання серійних доїльних апаратів. Розбирання та очищення внутрішніх поверхонь потрібно проводити під час чергового регламентного технічного обслуговування доїльного апарата. При цьому слід звернути увагу на додаткові операції з обслуговування клапанного механізму.

2. Розрахунки економічної ефективності вказали, що при використанні удосконаленого колектора можна отримати річну економію коштів у розмірі 996 грн з розрахунку на експлуатацію одного доїльного апарата. На тваринницькому підприємстві потужністю 600 корів використовується три доїльні установки із 48-ма доїльними апаратами, тому при використанні удосконаленого колектора можна отримати 47808 грн річної економії коштів.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз конструкцій серійних доїльних апаратів відомих на ринку виробників виявив невідповідність колектора щодо зоотехнічних вимог до якості отриманого молока та протікання технологічного процесу в цілому. До основних недоліків відносять спінювання молока у молочній камері колектора, що погіршує його якість. Цей недолік пояснюється переповненням центральної частини колектора молоком, обумовлений стандартною схемою його надходження та недосконалою системою своєчасного спорожнення колектора від молока впродовж такта стиску. Відомі конструктивні рішення не усувають в повній мірі виявлені недоліки.

2. Запропонована в кваліфікаційній роботі конструкція удосконаленого колектора доїльного апарата поєднала в собі позитивні ознаки серійного обладнання відомих світових виробників. Для покращення транспортування молока молочним шлангом у колекторі створюється додатковий тиск під час такту стиску. Для цього за допомогою розробленого клапанного механізму до молочної камери колектора надходить повітря із атмосферним тиском.

3. Ефект спінювання молока в удосконаленому колекторі усувається за рахунок зміни напрямку надходження молока до колектора. Так, молоко у молочну камеру колектора надходить по дотичній до його корпусу, що усуває проблему надмірного скупчення. За такої організації потоку молока, воно по стінкам молочної камери стікає до молочного шланга й далі до відра або молокопроводу. При цьому внутрішня порожнина молокозбірної камери залишається вільною, а ефект схожий аналогічно до італійського колектора із додатковим дифузором. Додатковий вільний простір сприяє стабільності вакуумметричного тиску під час машинного доїння корів.

4. Виконано розрахунок режимів роботи клапанного механізму під час такту ссання та під час такту стиску. Встановлено, що тривалість повного відкривання чи закривання клапана становить лише 0,006 с, тому до молочної камери повітря через сполучний канал буде надходити впродовж 0,161 с.

5. Виконано розрахунки на міцність елементів конструкції удосконаленого колектора. Встановлено, що для поєднання камери розподілу змінного тиску із корпусом колектора достатньо використовувати гвинт діаметром 4 мм, а для приєднання корпусу розробленого клапанного механізму достатньо чотирьох гвинтів діаметром 2 мм. При цьому, довжина різьбової поверхні у металевому корпусі колектора рівна 4 мм відповідає встановленим вимогам стійкості до руйнування.

6. Експлуатації удосконаленого колектора доїльного апарата вимагає дотримання загальних правил що стосуються використання серійних доїльних апаратів. Розбирання та очищення внутрішніх поверхонь потрібно проводити під час чергового регламентного технічного обслуговування доїльного апарата. При цьому слід звернути увагу на додаткові операції з обслуговування клапанного механізму.

7. Розрахунки економічної ефективності вказали, що при використанні удосконаленого колектора можна отримати річну економію коштів у розмірі 996 грн з розрахунку на експлуатацію одного доїльного апарата. На тваринницькому підприємстві потужністю 600 корів використовується три доїльні установки із 48-ма доїльними апаратами, тому при використанні удосконаленого колектора можна отримати 47808 грн річної економії коштів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фененко А. І. Механізація доїння корів Теорія і практика: монографія. Київ, 2008. 198 с.
2. Фененко А. И. Биотехническая система производства молока. Теория и практика: монография / под ред. акад. Адамчука В. В. – Нежин: Издатель ЧП Лысенко Н.М., 2014. 192 с.
3. Фененко А. І. Техніко-технологічні аспекти удосконалення біотехнічної ланки «машина-тварина» процесу виробництва молока. *Механізація і електрифікація сільського господарства*. 2007. Вип. 91. С 65–77.
4. Медведський О. В., Юхименко Д. О. Оцінка конструкційних особливостей колекторів доїльних апаратів. *Наукові читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 82–85.
5. Ревенко І. І., Манько В. М., Кравчук В. І. Машиновикористання у тваринництві ; за ред. І. І. Ревенка. К.: Урожай, 1999. 208 с.
6. Проектування механізованих технологічних процесів тваринницьких підприємств. / І. І. Ревенко, В. Д. Роговий, В. І. Кравчук ; за ред. І. І. Ревенка. К.: Урожай, 1999. 192с.
7. Машины та обладнання для тваринництва / за ред. І. Г. Бойко. Харків : Видавництво ХНТУСГ, 2006. 279 с.
8. Хомик Н. І., Довбуш А. Д. Машины та обладнання для тваринництва : курс лекцій. ч. 2. Тернопіль : Видавництво ТНТУ, 2013. 224 с.
9. Машины для тваринництва та птахівництва. / за ред. В. І. Кравчука та Ю. Ф. Мельника. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. 207 с.
10. Голуб Г. А., Медведський О. В., Ачкевич В. І., Ачкевич О. М. Встановлення раціональних конструкційно-технологічних параметрів колектора доїльного апарата. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2018. Вип. 1(1). С. 12–17.

11. Палій А. П. Вплив молокопровідних систем доїльних установок на споживчі показники молока. *Тваринництво України*. 2016. № 9. С. 20–22.
12. Фененко А. І., Сиротюк В. А. Режимна характеристика колектора молокопровідної лінії доїльного апарата. *Вісник Львівського державного аграрного університету : Агроінженерні дослідження*. 2006. № 10. С. 158–162.
13. Павленко С. І., Алієв Е. Б., Лінник Ю. О. Методика експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. № 5. С. 167–172
14. Підвісна частина МС-50 від компанії DeLaval : веб-сайт. URL : <https://www.delaval.com/uk/-/milking/at-the-milking-point/clusters/delaval-milking-cluster-mc50/>
15. Юхименко Д. О. Синтез удосконаленого колектора доїльного апарата. *Наукові читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 19 квітня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. Т. 3 С. 89–90.
16. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учебник для вузов. 7-е изд., испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
17. Бойко А. В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х. : НТУ «ХП», 2007. 444 с.
18. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под общ. ред. М. О. Штейнберга. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
19. Вакуумная техника : справочник. / Фролов Е. С., и др. ; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М. : Машиностроение, 1992. 480 с.
20. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість : підручник / за ред. Г. М. Калетніка, М. Г. Чаусова. Київ: Хай-Тек Прес, 2013. 528 с.