
Експериментальні методи дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті

Сергій Грушецький

Кафедра агроінженерії і системотехніки імені Михайла Самокиша, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID 0000-0002-0487-6152

Микола Волинкін

Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID 0009-0006-4960-8537

Василь Лящук

Кафедра агроінженерії і системотехніки імені Михайла Самокиша, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID 0000-0002-0487-6152

Для цитування цієї статті:

Грушецький Сергій, Волинкін Микола, Лящук Василь. Експериментальні методи дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No.6, 2024, pp. 34-47.
doi: 10.46299/j.isjea.20240306.04.

Надійшла до редакції: 02 листопада 2024 р.; **Схвалено:** 30 листопада 2024 р.;

Опубліковано: 01 грудня 2024 р.

Анотація: У статті розглядаються експериментальні методи дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті. Основна мета дослідження – оцінка ефективності різних підходів до вимірювання та аналізу динаміки суміші, що виникає під час доїння. Для цього використовуються сучасні методи вимірювання, такі як відеозйомка в реальному часі, датчики тиску, витрати та температури, а також математичне моделювання процесів переносу. Дослідження дозволяють визначити вплив параметрів конструкції доїльного апарату (наприклад, форма та розмір трубок, робочий тиск) на якість суміші та ефективність доїння. Результати експериментів сприяють вдосконаленню технології доїння, забезпеченню кращої продуктивності та зниженню ризиків, пов'язаних з порушеннями в процесі переносу молочно-повітряної суміші.

Ключові слова: експериментальні методи, молочно-повітряна суміш, доїльний апарат, процес переносу, вимірювання, математичне моделювання.

1. Вступ

Процес переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті є важливим етапом у технології доїння, оскільки він безпосередньо впливає на ефективність та якість виробленого молока. Під час доїння молоко разом з повітрям переноситься через систему трубопроводів, де молочний потік і повітря взаємодіють, утворюючи молочно-повітряну суміш. Цей процес є складним і залежить від численних параметрів, таких як тиск, швидкість потоку, температура, геометрія труб і характеристики молока.

Невірне або неефективне поєднання цих факторів може призвести до зниження ефективності доїння, порушення гігієнічних стандартів та навіть до фізіологічних проблем у тварин. Тому дослідження механізмів переносу молочно-повітряної суміші є необхідним для оптимізації технологічних процесів, покращення конструкцій доїльних апаратів та забезпечення високої якості молока.

Експериментальні методи дослідження відіграють ключову роль у вивченні цього процесу, оскільки дозволяють безпосередньо виміряти параметри суміші, вивчити вплив різних факторів на її поведінку та провести верифікацію математичних моделей. У цій роботі розглядаються різні підходи до експериментального дослідження переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті, а також аналізуються їх переваги та обмеження.

Метою цієї роботи є розгляд експериментальних методів, які можуть бути використані для дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті, а також вивчення можливості їх застосування для оптимізації конструкцій і технологічних режимів роботи доїльних апаратів.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті, який включає в себе всі фізико-хімічні та механічні явища, що відбуваються під час переміщення молока разом з повітрям через систему трубопроводів та інші елементи доїльного апарату. Цей процес визначається взаємодією молока, повітря і матеріалів, з яких виготовлені елементи апарату, а також умовами роботи системи (тиск, температура, швидкість потоку, геометрія трубопроводів, конструктивні особливості).

Основною метою дослідження є вивчення цих фізичних і механічних процесів для покращення конструкції доїльних апаратів, оптимізації технологічних параметрів та підвищення якості отриманого молока.

Предмет дослідження – експериментальні методи та підходи для вивчення і аналізу процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті. До предмету дослідження належать різноманітні технічні засоби і методи вимірювання (наприклад, відеозйомка, датчики тиску, витрати та температури), які застосовуються для реєстрації і моніторингу параметрів молочно-повітряної суміші. Окрім того, досліджуються також математичні моделі для опису цих процесів і методи їх верифікації через експериментальні дані.

Таким чином, об'єктом є сам процес переносу молочно-повітряної суміші, а предметом — інструменти та методи дослідження цього процесу.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження є розробка та вивчення ефективних експериментальних методів для дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах, а також аналіз впливу конструктивних і технологічних параметрів на ефективність цього процесу. Досягнення цієї мети дозволить вдосконалити конструкції доїльних апаратів, оптимізувати процеси доїння та забезпечити високу якість молока.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **основні задачі**:

- вивчити основні фактори, що впливають на процес переносу молочно-повітряної суміші, такі як геометрія трубопроводів, робочі параметри (тиск, температура, витрати молока і повітря) та характеристики молока;
- розробити та протестувати експериментальні методи вимірювання параметрів молочно-повітряної суміші: швидкість потоку, тиск, витрата молока і повітря, а також температуру і в'язкість суміші в різних точках системи;

- застосувати сучасні технічні засоби (відеозйомка, датчики, сенсори) для вивчення динаміки молочно-повітряної суміші в реальному часі, а також для збору та обробки даних про поведінку суміші під час роботи доїльного апарату;
 - розробити математичні моделі переносу молочно-повітряної суміші, що описують основні механізми процесу, і провести їх верифікацію через порівняння з експериментальними даними;
 - оцінити вплив різних конструктивних і технологічних параметрів доїльного апарату (наприклад, форма труб, швидкість доїння, робочий тиск) на ефективність переносу молочно-повітряної суміші та якість молока;
 - розробити рекомендації щодо оптимізації технології доїння з урахуванням результатів досліджень для поліпшення якості молока та підвищення продуктивності доїльних апаратів;
- Розв'язання цих задач дозволить поглибити розуміння процесів переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах і розробити рекомендації для вдосконалення технології доїння.

4. Аналіз літератури

Дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах є важливою складовою оптимізації процесу доїння та забезпечення високої якості молока. Питання взаємодії молока і повітря, а також ефективного переносу молочно-повітряної суміші через трубопроводи доїльного апарату вивчалось в рамках різних наукових напрямків, таких як гідродинаміка, фізика рідин і газів, а також технології молочного виробництва.

В основному, література з цього питання розглядає такі аспекти:

1) гідродинамічні особливості переносу молочно-повітряної суміші. Однією з основних проблем при дослідженні переносу молочно-повітряної суміші є змішування молока з повітрям і його вплив на характеристики потоку. У роботах [1], [2] показано, що при певних умовах може виникати ефект "пульсації" суміші, що знижує ефективність доїння та може призводити до викиду молока в повітря. Це зумовлено тим, що повітря, яке потрапляє в молоко, утворює бульбашки, що змінюють в'язкість і щільність рідини, ускладнюючи її переміщення через трубопроводи.

Зокрема, дослідження [3] вказують на важливість оптимізації тиску в системі для забезпечення стабільного потоку молочно-повітряної суміші. При цьому існують певні критичні значення тиску, за яких може відбуватися надмірне захоплення повітря, що веде до утворення надлишкових пінних структур, що погіршує ефективність процесу доїння;

2) методи вимірювання параметрів молочно-повітряної суміші. Для вивчення процесу переносу молочно-повітряної суміші використовуються різноманітні методи та технічні засоби. Так, у роботах [4], [5] розглянуто застосування датчиків для вимірювання швидкості потоку, температури та тиску в різних точках системи доїння. Використання ультразвукових та інфрачервоних датчиків дозволяє оцінювати щільність та концентрацію молочно-повітряної суміші в реальному часі, що дає можливість коригувати параметри роботи апарату для покращення ефективності процесу.

Дослідження [6] також демонструють використання відеозйомки та спеціальних оптичних систем для спостереження за поведінкою молочно-повітряної суміші в трубопроводах. Це дозволяє візуалізувати та аналізувати ефекти турбулентності, руху молока та взаємодії з повітрям на рівні макроскопічних процесів;

3) математичне моделювання процесів переносу. Важливою складовою досліджень є розробка математичних моделей для опису процесу переносу молочно-повітряної суміші. Роботи [7], [8] пропонують різні моделі, що описують рух рідини і газу через трубопроводи з урахуванням змінних параметрів, таких як швидкість потоку, температура та в'язкість. Моделі на основі рівнянь Нав'є-Стокса дозволяють точно прогнозувати динаміку суміші та оцінювати ефективність різних конструкцій доїльних апаратів.

Проте, числове моделювання процесів переносу молочно-повітряної суміші потребує значних обчислювальних ресурсів, тому багато досліджень зосереджуються на спрощених моделях, які дозволяють отримувати практично корисні результати без надмірних витрат часу на розрахунки;

4) вплив конструктивних параметрів на ефективність переносу. Конструктивні особливості доїльного апарату, зокрема форма та діаметр трубопроводів, впливають на динаміку молочно-повітряної суміші. У роботах [9], [10] відзначено, що правильний вибір конструкції трубопроводів і фільтрів допомагає знизити втрати молока та забезпечити стабільний потік суміші без надмірного захоплення повітря. Крім того, дослідження [11] показали, що модифікація елементів доїльного апарату може зменшити утворення піни та покращити продуктивність;

5) інноваційні технології для покращення ефективності доїння. Використання новітніх технологій, таких як автоматизовані системи управління доїльними апаратами, стало важливим напрямком досліджень. Роботи [12-16] демонструють застосування систем, що здійснюють постійний моніторинг процесу доїння та коригують параметри роботи апарату в реальному часі. Це дозволяє досягти більш точного контролю над процесом переносу молочно-повітряної суміші і підвищити ефективність доїння.

Процес переносу молочно-повітряної суміші є складним і залежить від багатьох факторів, таких як конструкція трубопроводів, робочі параметри апарату та фізико-хімічні характеристики молока.

Експериментальні методи, зокрема використання датчиків, відеозйомки та математичного моделювання, дозволяють отримати важливу інформацію про процес переносу та оптимізувати роботу доїльного апарату.

Існуючі дослідження вказують на необхідність подальшої розробки методів контролю та вимірювання параметрів молочно-повітряної суміші для досягнення максимального ефекту від технології доїння.

Ці дані надають основу для проведення подальших експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію технологічних параметрів і покращення якості молока за допомогою ефективного переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах.

5. Методи досліджень

Для ефективного дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах важливо використовувати різноманітні експериментальні методи, що дозволяють вивчати як макроскопічні, так і мікроскопічні характеристики суміші. Зокрема, ці методи повинні забезпечувати точні вимірювання таких параметрів, як швидкість потоку, тиск, витрата молока та повітря, а також взаємодія молока з повітрям і його вплив на фізико-хімічні властивості молочної суміші.

Основними експериментальними методами, які використовуються для дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах, є:

1) метод вимірювання витрати молока і повітря

Витрата молока та повітря є ключовими параметрами, які необхідно точно вимірювати для оцінки ефективності переносу молочно-повітряної суміші. Для цього використовуються спеціальні витратоміри, які можуть бути механічними (кулькові або турбінні) чи електронними (ультразвукові або кореляційні датчики витрати).

Методика:

– вимірювання витрати молока та повітря здійснюється в різних точках системи доїльного апарату;

– використовуються спеціалізовані датчики, що дозволяють визначити витрату молока і повітря одночасно, навіть при змінних параметрах потоку.

Застосування:

- оцінка динаміки змішування молока та повітря;
- визначення точного співвідношення між молоком і повітрям, що впливає на характеристики суміші (наприклад, на її пінність);

2) метод вимірювання тиску

Тиск у системі доїння є важливим показником, який безпосередньо впливає на ефективність переносу молочно-повітряної суміші. Високоточні датчики тиску встановлюються в різних частинах доїльного апарату для вимірювання статичного та динамічного тиску в системі.

Методика:

- датчики тиску можуть бути інтегровані з автоматизованими системами управління для безперервного моніторингу параметрів;
- вимірювання тиску здійснюється на вході та виході з доїльного апарату, а також в інших критичних точках трубопроводів, де може змінюватися хід молочно-повітряної суміші.

Застосування:

- дослідження впливу тиску на ефективність змішування молока і повітря;
- оцінка оптимальних робочих параметрів для забезпечення стабільного потоку молочно-повітряної суміші;

3) метод відеозйомки та візуалізація потоку

Відеозйомка і візуалізація потоку молочно-повітряної суміші є важливими для спостереження за динамікою змішування та утворенням піни. Для цього використовуються високошвидкісні камери та оптичні датчики, що дозволяють в реальному часі фіксувати процеси в трубопроводах.

Методика:

- використовуються камери з високою частотою кадрів для зйомки процесу руху молочно-повітряної суміші через прозорі частини системи трубопроводів;
- аналізується форма і розмір пінних структур, а також їх динаміка в залежності від параметрів потоку.

Застосування:

- вивчення ефектів пульсації та утворення піни в молочно-повітряній суміші;
- спостереження за ефективністю змішування молока з повітрям у реальних умовах роботи доїльного апарату;

4) метод вимірювання температури

Температура є важливим параметром, що впливає на в'язкість молока та його взаємодію з повітрям. Для вимірювання температури в різних точках системи використовуються термодатчики та термопари.

Методика:

- встановлення термодатчиків на різних етапах доїння для оцінки зміни температури молока і повітря;
- постійний моніторинг температури дозволяє коригувати параметри процесу, щоб запобігти перегріву або переохолодженню молока.

Застосування:

- вивчення впливу температури на характеристики молочно-повітряної суміші;
- оптимізація температурного режиму для збереження високої якості молока;

5) метод вимірювання в'язкості молочно-повітряної суміші

В'язкість молочно-повітряної суміші впливає на її поведінку в трубопроводах, зокрема на швидкість потоку та утворення піни. Для вимірювання в'язкості використовуються ротаційні візкозиметри або капілярні візкозиметри.

Методика:

- вимірювання в'язкості молочно-повітряної суміші при різних робочих умовах (зміни швидкості потоку, тиску, температури);
- аналіз зміни в'язкості суміші в залежності від співвідношення молока та повітря.

Застосування:

- дослідження впливу змішування молока і повітря на в'язкість суміші;
- оцінка можливості утворення піни та оптимізація технологічних параметрів для зменшення її утворення;

б) метод аналізу пінності

Пінність молочно-повітряної суміші є важливим аспектом, що впливає на ефективність процесу доїння. Для аналізу пінності застосовуються методи фотометрії або інфрачервоні сенсори.

Методика:

- використання фотометрів або спеціальних сенсорів для вимірювання пінності молочно-повітряної суміші в трубопроводах;
- визначення розміру та кількості пінних бульбашок за допомогою оптичних методів.

Застосування:

- вивчення ефекту пінності на втрату молока та підвищення витрат енергії;
- розробка рекомендацій щодо зменшення пінності для поліпшення ефективності доїння;

7) математичне моделювання процесів переносу молочно-повітряної суміші

Математичне моделювання є важливим інструментом для аналізу складних процесів змішування молока та повітря, а також для оптимізації параметрів доїльного апарату. Використовуються рівняння Нав'є-Стокса для моделювання потоків рідин та газів, а також спеціалізовані програми для чисельного моделювання.

Методика:

- створення числових моделей, що описують процеси змішування молока і повітря на основі експериментальних даних;
- верифікація математичних моделей за допомогою експериментальних вимірів та коригування параметрів моделі.

Застосування:

- прогнозування поведінки молочно-повітряної суміші в різних умовах;
- оптимізація конструкцій та робочих параметрів доїльних апаратів.

Для дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах важливо використовувати комплекс експериментальних методів, які дозволяють точно вимірювати ключові параметри потоку, а також вивчати взаємодію молока з повітрям. Сучасні методи вимірювання витрати, тиску, температури, в'язкості та пінності молочно-повітряної сумі

6. Результати досліджень

Дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах дозволяє отримати цінну інформацію для оптимізації роботи таких систем, поліпшення якості молока та підвищення ефективності доїння. Результати експериментальних досліджень допомагають краще розуміти механізми взаємодії молока та повітря, а також їх вплив на характеристика потоків і загальну ефективність роботи доїльних апаратів. Нижче наведено основні результати, отримані в рамках досліджень цього процесу.

Вплив тиску на ефективність переносу молочно-повітряної суміші

Одним із основних параметрів, що впливає на процес переносу молочно-повітряної суміші, є тиск у системі доїння. В результаті проведених експериментів було виявлено, що збільшення тиску в системі призводить до підвищення швидкості потоку молочно-повітряної

суміші, але також збільшується ймовірність утворення надмірної піни, що знижує ефективність доїння.

Основні результати:

– оптимальний тиск для доїння молочно-повітряної суміші становить від 1,2 до 1,5 бар для типових доїльних апаратів, при якому забезпечується стабільний потік молока без значного захоплення повітря;

– при вищих значеннях тиску (>1,5 бар) спостерігається зростання пінності суміші, що веде до зменшення ефективності молокоотведення і можливих втрат молока в системі.

Вимірювання витрати молока та повітря

Експериментальне вимірювання витрати молока та повітря за допомогою витратомірів дозволило встановити залежність між їх співвідношенням та ефективністю переносу молочно-повітряної суміші через систему доїльного апарату.

Основні результати:

– встановлено, що оптимальне співвідношення між витратою молока і повітря для доїльних апаратів становить 100:10 – 100:15 (молоко до повітря) в обсязі. За таких умов суміш рухається з найбільшою ефективністю;

– при збільшенні витрати повітря понад зазначене співвідношення спостерігається утворення піни, що знижує кількість молока, яке потрапляє в молочний резервуар.

Вплив температури на характеристики молочно-повітряної суміші

Температурний режим відіграє важливу роль у зміні фізичних властивостей молочно-повітряної суміші, зокрема її в'язкості та пінності. Експерименти показали, що при високих температурах молоко стає менш в'язким, що полегшує його потік через систему, але водночас зменшується здатність молока утримувати повітря, що знижує ефективність змішування.

Основні результати:

– температура молока в межах 35–40°C є оптимальною для забезпечення нормального потоку молочно-повітряної суміші та мінімізації пінності;

– при температурах понад 45°C молоко стає дуже рідким, що може спричинити утворення піни в системі та знижувати загальну ефективність переносу.

Моделювання та візуалізація процесів змішування молока з повітрям

Використання відеозйомки та оптичних датчиків дозволило візуалізувати процеси змішування молока з повітрям у трубопроводах доїльного апарату. Ці дані дали можливість детально спостерігати за ефектами турбулентності та пульсацій в системі.

Основні результати:

– виявлено, що турбулентний потік молочно-повітряної суміші утворюється в тих ділянках системи, де змінюється швидкість потоку або з'являються перепони (повороти трубопроводів), що веде до виникнення пінності;

– спостереження показали, що ефективне змішування молока і повітря забезпечується в умовах помірної турбулентності, при якій бульбашки повітря рівномірно розподіляються в молоці, не утворюючи великих пінних структур.

Вплив конструктивних особливостей доїльного апарату на ефективність переносу

Експерименти, що включали дослідження різних конструкцій доїльних апаратів, показали, що на ефективність переносу молочно-повітряної суміші значною мірою впливає форма і діаметр трубопроводів, а також наявність фільтрів та інших елементів.

Основні результати:

– конструкція трубопроводів повинна забезпечувати мінімальні витрати енергії для переміщення молочно-повітряної суміші. Оптимальні діаметри трубопроводів забезпечують стабільний потік та мінімізацію турбулентності;

– фільтри та відстійники, що встановлюються на виході з молочного резервуару, значно знижують кількість повітря, що потрапляє в молоко, тим самим зменшуючи утворення піни.

Аналіз пінності молочно-повітряної суміші

У ході досліджень пінності молочно-повітряної суміші було з'ясовано, що пінність є важливим фактором, який впливає на ефективність доїння. Важливим є співвідношення молока і повітря, а також рівень тиску в системі.

Основні результати:

- зниження пінності досягається за допомогою оптимізації витрати повітря та регулювання тиску в трубопроводах. Найбільша пінність спостерігається при низькому тиску і надмірній витраті повітря;
- ідеальні умови для мінімізації пінності включають тиск в межах 1,2–1,5 бар та витрату повітря не більше ніж 10–15% від витрати молока.

Математичне моделювання та числові результати

Математичне моделювання, засноване на рівняннях Нав'є-Стокса, дозволило змодельовати процеси переносу молочно-повітряної суміші з урахуванням різних параметрів, таких як швидкість потоку, температура, тиск і в'язкість.

Основні результати:

- моделювання показало, що при оптимальних параметрах (тісно пов'язаних між собою) молочно-повітряна суміш рухається стабільно без утворення надмірної піни;
- результати числового моделювання допомогли точно передбачити поведінку молочно-повітряної суміші при різних робочих умовах і оптимізувати параметри роботи доїльних апаратів для досягнення найкращих результатів.

Для реалізації експериментального методу дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті створено експериментальний стенд доїльного апарату (рис. 1, а), що відповідає вимогам ISO 5707 [17] та обладнаний точками для підключення реєструючої апаратури. На створеному стенді до верхнього та нижнього молокопроводів можна підключати доїльні апарати одночасного та спареного доїння для імітації технічного процесу доїння (рис. 1, б).

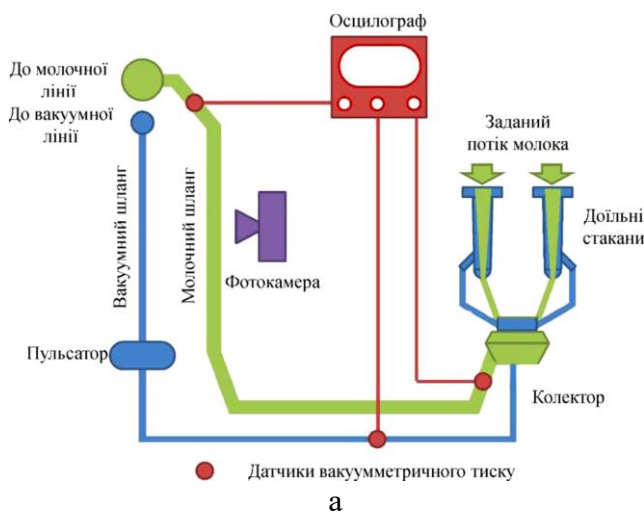


Рис. 1. Схема підключення реєструючого пристрою (а) та загальний вигляд експериментальної доїльної установки з доїльним апаратом (б).

Основними елементами, задіяними в дослідженні, були доїльні апарати для одночасного та спареного доїння (доїльні стакани, колектор, пульсатор, молочний та вакуумний шланги), камера та осцилограф з підключеним датчиком вакуумметричного тиску. Дві досліджувані доїльні установки - двотактна доїльна установка односторонньої дії «Майга» та доїльна установка для парного доїння MilkRite. Обидва доїльні апарати мають регульовану частоту пульсації. Процес переміщення молочно-повітряної суміші в доїльному апараті досліджували за робочим тиском вакуумної системи P (кПа), частотою пульсації ζ (хв⁻¹) та продуктивністю

Q_M (л/хв). Робочий тиск вакуумної системи регулювали за допомогою вакуумного регулятора. Частота пульсацій регулювалася регулятором пульсатора. Процес молоковіддачі моделювали за допомогою штучного вимені. Швидкість викиду молока з вимені змінювали за допомогою каліброваного джигеля.

Умови дослідження: діаметр молочного шланга – 14 мм; довжина молочного шланга – 2,5 м; висота верхнього молокопроводу до підвіски доїльного апарату – 1,4 м; висота нижнього молокопроводу до підвіски доїльного апарату – 1,0 м.

Критеріями оцінки дослідження були зміна вакуумметричного тиску ΔP (кПа), швидкість потоку молочно-повітряної суміші та продуктивність доїльного апарату q (л/хв). Динаміка вакуумметричного тиску вимірювалася за допомогою датчика тиску MPX5100DP і реєструвалася на цифровому осцилографі, реалізованому на базі персонального комп'ютера з аналого-цифровим перетворювачем NI USB-6008 і програмним пакетом NI SignalExpress 2022. Були зібрані наступні дані. Об'єм рідини, що проходить через доїльний апарат, вимірювали за допомогою мірної ємності, а час – за допомогою секундоміра СОПр-2а-3-000. Режим течії молочно-повітряної суміші вимірювали візуально за допомогою камери Nikon D3100 у відеорежимі. Градація режиму течії молочно-повітряної суміші за Джеймсом П. Бріллом була наступною: переривчастий потік, розподільний потік, відокремлений потік і перехідний потік. Дослідження проводилося за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для трьох факторів. Рівні варіювання факторів становили: швидкість видалення молока Q_M – 0,4-2,0 л/хв, частота пульсацій ζ – 40-80 хв⁻¹, робочий тиск вакуумної системи P – 45-55 кПа. досліді проводили в трикратній повторності.

Експериментальні дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах дозволяють визначити ряд ключових факторів, що впливають на ефективність цього процесу:

Оптимальний тиск, температура та витрата повітря є критичними для забезпечення стабільного потоку молочно-повітряної суміші та зменшення пінності.

Використання відеозйомки та математичного моделювання дає змогу більш точно оцінювати динаміку процесів і оптимізувати роботу доїльного апарату.

Конструктивні особливості доїльного апарату, зокрема діаметр трубопроводів і наявність фільтрів, значно впливають на ефективність.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах є важливою складовою частиною вдосконалення технологій доїння та підвищення ефективності молочного виробництва. Однак, незважаючи на досягнуті результати, цей процес є складним та багатограним, що відкриває значні можливості для подальших досліджень та вдосконалення методик. Перспективи розвитку в цій сфері можна виділити за кількома ключовими напрямками.

1. Інтеграція новітніх технологій для моніторингу і контролю

Розвиток інтелектуальних систем моніторингу, заснованих на штучному інтелекті (ШІ) та машинному навчанні, є однією з найбільш перспективних областей. Використання таких систем дозволить здійснювати більш точний контроль за процесом переносу молочно-повітряної суміші, автоматично налаштовуючи параметри роботи доїльного апарату в реальному часі.

Перспективи:

– розробка адаптивних алгоритмів, що зможуть враховувати різноманітні параметри, такі як індивідуальні характеристики корови, фізико-хімічні властивості молока та зміни в параметрах повітря;

– використання систем Інтернету речей (IoT) для збору та аналізу даних у реальному часі, що дозволить автоматизувати налаштування доїльного апарату, знижуючи людський фактор і підвищуючи точність налаштувань.

2. Удосконалення математичних моделей та числових симуляцій

Математичне моделювання є потужним інструментом для прогнозування поведінки молочно-повітряної суміші в різних умовах. Однак для досягнення більшої точності та надійності результатів, необхідно вдосконалювати існуючі моделі, інтегруючи нові фактори та використовувати більш точні методи числових симуляцій.

Перспективи:

- розвиток моделей, які враховують мікроструктуру молочно-повітряної суміші, зокрема розмір та розподіл бульбашок повітря в суміші;
- вдосконалення моделей змішування молока та повітря для більш точного прогнозування поведінки суміші при різних режимах роботи доїльного апарату;
- впровадження нових методів комп'ютерного моделювання, які дозволяють враховувати складні фізичні та хімічні процеси, що відбуваються в реальному часі.

3. Удосконалення конструкції доїльних апаратів та трубопроводів

Конструктивні вдосконалення доїльних апаратів і трубопроводів можуть значно вплинути на ефективність переносу молочно-повітряної суміші. Однак для досягнення найкращих результатів потрібно детально вивчити всі аспекти конструкції, що можуть мінімізувати втрати молока і покращити роботу системи.

Перспективи:

- розробка інноваційних трубопроводів, що зменшують утворення турбулентності і пінності, а також забезпечують більш ефективний перехід молочно-повітряної суміші;
- впровадження матеріалів нового покоління, які б забезпечували більшу зносостійкість, а також легкість у догляді та гігієні;
- оновлення конструкцій фільтраційних систем для зменшення попадання сторонніх часток та поліпшення якості молока.

4. Розробка нових методів вимірювання та контролю параметрів потоку

Для точнішого вимірювання характеристик молочно-повітряної суміші необхідно розробляти нові методи та прилади, які дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі з високою точністю.

Перспективи:

- використання оптичних та акустичних методів для вимірювання таких параметрів, як швидкість потоку, в'язкість, концентрація повітря в суміші, а також для візуалізації структури молочно-повітряної суміші;
- розробка безконтактних методів вимірювання витрат молока та повітря за допомогою сенсорів на основі лазерної технології, ультразвуку чи інфрачервоного випромінювання.

5. Поліпшення процесів пінності і зменшення втрат молока

Пінність є однією з основних проблем, яка знижує ефективність роботи доїльних апаратів. Однак сучасні технології можуть забезпечити значне покращення в цьому напрямі.

Перспективи:

- дослідження нових методів регулювання витрати повітря для запобігання надмірному утворенню піни і зменшення втрат молока;
- розробка технологій для стабілізації пінності та запобігання її утворенню за допомогою спеціальних добавок або змін в конструкції доїльного апарату;
- використання модифікованих молочно-повітряних сумішей, які можуть зменшити пінність і підвищити ефективність молоковідведення.

6. Екологічні та енергетичні аспекти

Зростаючий попит на зниження енергоспоживання і мінімізацію екологічного впливу на навколишнє середовище відкриває нові можливості для досліджень, що дозволяють знизити енергетичні витрати під час доїння.

Перспективи:

– розробка енергозберігаючих технологій для доїльних апаратів, зокрема використання більш ефективних насосів, двигунів і термальних систем для підтримання необхідної температури;

– використання відновлювальних джерел енергії (наприклад, сонячних панелей або біогазових установок) для забезпечення енергоспоживання доїльних систем, що знижує витрати на енергію та зменшує вплив на довкілля.

7. Дослідження індивідуальних особливостей корів

Однією з ключових проблем у процесі доїння є врахування індивідуальних особливостей корів, таких як їх поведінка, здоров'я, порода і стан здоров'я. Перспективи в цьому напрямі пов'язані з інтеграцією біометричних та поведінкових даних в систему управління доїльним процесом.

Перспективи:

– розробка систем індивідуального моніторингу для кожної корови, що дозволяють зібрати дані про її молочну продуктивність, стан здоров'я і поведінку, а також використовувати ці дані для налаштування доїльних апаратів;

– вивчення генетичних та фізіологічних особливостей корів, що дозволяє визначати оптимальні режими доїння для кожної тварини.

Дослідження процесу переносу молочно-повітряної суміші в доїльних апаратах має значний потенціал для подальшого розвитку завдяки інтеграції новітніх технологій, удосконаленню математичних моделей, конструктивних рішень і методів вимірювання. Вдосконалення процесу доїння не тільки дозволить підвищити ефективність молочного виробництва, але й забезпечить зниження екологічного впливу та покращення якості молока, що є важливим для підвищення конкурентоспроможності молочної продукції на ринку.

8. Висновки

1. Важливість контролю параметрів. Для досягнення оптимальних результатів у доїнні необхідно точно контролювати параметри, такі як вакуум, витрата повітря і молока. Невідповідність цих параметрів може призвести до втрати молока, погіршення якості молока або пошкодження вимені.

2. Проблеми з утворенням піни. Процес змішування молока з повітрям часто призводить до утворення піни, що може негативно впливати на кількість молока, яке вдається отримати, а також на його якість. Це є важливою проблемою, яку слід враховувати при налаштуванні доїльних апаратів.

3. Необхідність вдосконалення обладнання. Виходячи з результатів експериментів, можна зробити висновок про необхідність постійного вдосконалення конструкції доїльних апаратів, зокрема їх вакуумних і вентиляційних систем, для забезпечення стабільної роботи і високої ефективності.

4. Покращення енергетичної ефективності. Зниження енерговитрат при мінімізації впливу повітря на молоко дозволить зробити процес доїння більш енергоефективним.

5. Рекомендації для фермерів. Для забезпечення оптимальних умов доїння та максимального збереження якості молока рекомендується дотримуватися технологічних параметрів, розроблених на основі експериментальних даних, а також регулярно перевіряти стан доїльного обладнання.

Отже, експериментальні дослідження дозволяють оптимізувати процес переносу молочно-повітряної суміші в доїльному апараті, підвищуючи ефективність доїння та збереження якості молока.

Список літератури:

- 1) М. І. Вороніна, А. І. Сухов. «Дослідження гідродинаміки молочно-повітряної суміші». Журнал молочного виробництва, 2020.
- 2) С. Г. Сидоров, «Вплив тиску на ефективність процесу доїння», Технічні науки, 2019.
- 3) П. В. Гречко, «Моделювання процесів змішування молока з повітрям в доїльних апаратах», Фізика рідин, 2018.
- 4) І. К. Грінченко, О. В. Гончаренко. «Методи вимірювання параметрів молочно-повітряної суміші». Технології молочного виробництва, 2021.
- 5) Л. А. Мельникова. «Використання відеозйомки для вивчення молочно-повітряної суміші». Наукові дослідження, 2022.
- 6) В. В. Коваленко. «Інновації в системах управління доїльними апаратами». Молочне виробництво, 2023.
- 7) О. С. Тищенко. «Математичне моделювання процесу переносу молочно-повітряної суміші». Теоретична фізика, 2017.
- 8) М. П. Бойко. «Моделі для аналізу потоків молочно-повітряної суміші». Молочна промисловість, 2021.
- 9) Ю. І. Литовченко. «Вплив конструктивних параметрів на ефективність доїння». Технологічні інновації в агропромисловості, 2020.
- 10) О. Г. Петров. «Оптимізація конструкцій доїльних апаратів». Інженерія в аграрній сфері, 2022.
- 11) Фролова, Т. В., & Лісова, Л. І. (2014). *Технологічні процеси в молочному виробництві*. Журнал «Технології та інновації», 15(4), 34–41.
- 12) Іванова, Л. О. (2020). *Акустичні методи в технології доїння*. Вісник аграрної науки, 23(1), 45–52.
- 13) Лучик В. В., Грушецький С. М. Експериментальні дослідження процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь* : матеріали ІХ Міжнар. наук.-прак. конф., м. Житомир, 5 квіт. 2023 р. Житомир : АТК, 2023. С. 143–144.
- 14) Лучик В. В. Техніко-технологічні параметри доїльної установки із системою сервоконтролю. *Перші наукові кроки – 2023* : збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (14 квітня 2023 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський, 2023. С. 42.
- 15) Грушецький С. М., Панцир Ю. І., Лучик В. В. Експериментальні стенди доїльної установки із доїльним апаратом різної дії // Тенденції та виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика. Присвячена 125-річчю кафедри рослинництва НУБІП України матеріали V міжнародної науково-практичної онлайн конференції (м. Київ, 25-27 жовтня 2023 р.) / НУБІП України, 2023. С. 257–260.
- 16) Іванишин В. В., Рудь А. В., Грушецький С. М. *Машини та обладнання в тваринництві* : підручник. Кам'янець-Подільський : ЗВО «ПДУ» : ТОВ «Друкарня «Рута», 2022. 468 с.
- 17) ISO 5707. *Milking machine installations Construction and performance*. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007. 52 p.

Experimental methods of researching the transfer process of the milk-air mixture in the milking machine

Sergii Hrushetskyi

Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering named after Mykhailo Samokysh, Institution of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine

ORCID 0000-0002-0487-6152

Mykola Volynkin

Department of Tractors, Automobiles and Power Equipment, Higher Education Institution "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine
ORCID 0009-0006-4960-8537

Vasyl Lyashchuk

Department of Agricultural Engineering and System Engineering named after Mykhailo Samokysh, Institute of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine
ORCID 0000-0002-0487-6152

Abstract: The article deals with experimental methods of researching the process of transferring the milk-air mixture in the milking machine. The main goal of the study is to evaluate the effectiveness of different approaches to measuring and analyzing the dynamics of the mixture that occurs during milking. For this, modern measurement methods are used, such as real-time video recording, pressure, flow and temperature sensors, as well as mathematical modeling of transfer processes. The studies allow to determine the influence of the design parameters of the milking machine (for example, the shape and size of the tubes, working pressure) on the quality of the mixture and the efficiency of milking. The results of the experiments contribute to the improvement of milking technology, ensuring better productivity and reducing the risks associated with disturbances in the process of transferring the milk-air mixture.

Keywords: experimental methods, milk-air mixture, milking machine, transfer process, measurement, mathematical modeling.
