

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**БАБИН Ігор Анатолійович**

УДК 637.115:621.647.7(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ  
СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК**

05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Вінниця – 2020**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Гулько Ірина Василівна,**  
Вінницький національний аграрний університет,  
проректор з науково-педагогічної та  
навчальної роботи.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дмитрів Василь Тарасович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри механіки та  
автоматизації машинобудування;

доктор технічних наук, старший дослідник  
**Алієв Ельчин Бахтияр огли,**  
Інститут олійних культур Національної академії  
аграрних наук України, завідувач відділу  
техніко-технологічного забезпечення насінництва.

Захист відбудеться « 6 » серпня 2020 року о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.854.02 у Вінницькому національному аграрному університеті за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного аграрного університету за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

Автореферат розіслано « 3 » липня 2020 р.

**Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради**

**І.А. Деревенько**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Державною цільовою програмою розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року передбачено збільшення виробництва молока і поліпшення його якості. Серед показників якості як сировини для подальшої переробки суттєвим є його бактеріальна забрудненість. Цей показник залежить від санітарно-гігієнічного стану доїльного обладнання, своєчасного охолодження молока, вимог та впливу інших зовнішніх чинників. У процесі доїння молоко проходить через доїльні апарати, молокопровід, молокозбірники, індивідуальні та групові лічильники тощо, які є джерелом бактеріального забруднення. Рекомендованими умовами покращення якості молока є забезпечення ефективності процесу промивання доїльних установок шляхом збільшення його тривалості, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат (води, мийних засобів, електроенергії тощо) та собівартості молочної продукції. Таким чином, створення автоматизованого техніко-технологічного забезпечення системи промивання доїльних установок, що інтенсифікує процес без додаткових витрат, набуває першочергового значення при вирішенні завдання підвищення якості молока.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Дослідження проведені у Вінницькому національному аграрному університеті згідно з планом науково-дослідних робіт на 2012-2018 рр. «Інтенсифікація процесів харчових, фармацевтичних та мікробіологічних виробництв шляхом механічної та теплофізичної технологічної дії» (державний реєстраційний номер 0112U006704) та на 2018-2022 рр. «Педагогічні та технічні основи розвитку наукової діяльності з проектування сільськогосподарських машин й технологічних процесів» (державний реєстраційний номер 0117U007539).

**Мета дослідження:** підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок шляхом використання повітряних та гідравлічних інжекторів з автоматизованим керуванням режимних параметрів їх дії в залежності від показників забруднення молокопровідного обладнання.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою ефективність роботи системи промивання доїльних установок залежить від гідродинамічних процесів руху двофазного мийного розчину і може бути підвищена шляхом використання відповідного устаткування, призначення якого створити умови інтенсифікації процесу руйнування молочних відкладень на поверхнях молокопровідного обладнання, які контактують із молоком.

### **Задачі дослідження:**

- визначити напрями вдосконалення техніко-технологічного забезпечення процесу промивання доїльних установок;
- дослідити явище адгезії між молочними відкладеннями і поверхнею молокопровідних ліній і визначити умови руйнування;
- розробити математичну модель гідродинамічного руху двофазного мийного розчину в молокопровідних лініях систем промивання доїльних установок з повітряним інжектором;
- розробити математичну модель роботи гідравлічного інжектора системи промивання;

- розробити систему автоматизації контролю рівня забрудненості молочними відкладеннями молокопровідних ліній доїльних установок;

- провести експериментальні дослідження розробленої системи автоматизованого контролю режимних параметрів роботи повітряного та гідравлічного інжекторів;

- провести виробничу перевірку та економічну оцінку ефективності розробленої автоматизованої системи промивання молокопровідних ліній доїльних установок.

**Об'єкт дослідження.** Технологічний процес промивання молокопровідних ліній доїльних установок.

**Предмет дослідження.** Закономірності впливу кінематико-динамічних характеристик двофазного мийного середовища на ступінь очищення молокопровідних систем від фізико-механічних властивостей молочних відкладень та параметрів технічної системи доїльних установок й двофазного мийного середовища.

**Методи дослідження.** Основою теоретичних досліджень є методи чисельного моделювання, параметричного синтезу технічних систем з використанням математичних моделей взаємодії компонентів у багатофазних середовищах, основних положень механіки, законів гідро-пневмодинаміки, інтегрального й диференційного числення з застосуванням методів оптимізації систем.

Експериментальні дослідження проводились в умовах наукових лабораторій та реального виробничого процесу із використанням математичного методу планування експерименту, методів експертних оцінок і натурних спостережень, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювалася з використанням кореляційно-регресійного аналізу.

Обробка результатів досліджень здійснювалася із використанням програмних пакетів Mathematica, Star CCM+ і Planning Experiment.

**Наукова новизна одержаних результатів.** *Вперше:*

- встановлено аналітичну залежність руху двофазного мийного розчину молокопровідною лінією доїльної установки з урахуванням гідравлічного удару, які обґрунтовують амплітудно-частотні характеристики системи промивання в залежності від конструкційних параметрів системи й фізико-механічних характеристик двофазного мийного розчину;

- розроблено математичні залежності, що уможливають оптимізацію режимних параметрів повітряного інжектора в залежності від конструктивних параметрів молокопроводів за мінімізації швидкості зміни тиску на довжині молокопровідної лінії і забезпечує руйнування молочних відкладень;

- отримано залежності якісних показників процесу промивання, які встановлюють вплив режимних характеристик повітряного інжектора системи промивання та конструкційних параметрів молокопровідної системи доїльної установки.

*Отримали подальший розвиток:*

- залежність швидкості руху мийного розчину з урахуванням силових характеристик адгезії та фізико-механічних показників молочних відкладень, яка враховує конструкційні параметри молокопроводу та фізико-механічні характеристики мийного розчину, за якої уможливується подолання сил адгезії молочних відкладень.

*Удосконалено:*

– методику дослідження забрудненості молокопровідної лінії на основі інтенсивності проходження світла заданого спектру через досліджуваний шар та встановлено кореляційний зв'язок між товщиною шару забруднення й інтенсивністю світлового потоку і коефіцієнтом поглинання світла шаром забруднення.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено конструктивну схему автоматизованої системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок різних типів, які були впроваджені на підприємстві ТДВ «Брацлав» (сmt. Брацлав, Вінницька обл.), ПП «Агромех Плюс» (м. Дніпро). Результати наукових досліджень пройшли виробничу перевірку та використані фермерськими господарствами ПП «АФ Батьківщина» і ПП «Радівське».

Запропонований метод використання явища гідравлічного удару та струменевого потоку мийного розчину в системі промивання доїльних установок, як засіб інтенсифікації процесу руйнування молочних відкладень, підвищує ефективність системи промивання і якість промивання молокопровідних систем.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені при викладанні навчальних дисциплін «Машини та обладнання в тваринництві», «Технічне обслуговування машин та обладнання» при підготовці бакалаврів та магістрів зі спеціальності «Агроінженерія» у Вінницькому національному аграрному університеті.

Новизну технічних рішень та можливе промислове впровадження автоматичної системи промивання молокопровідної лінії доїльної установки підтверджено патентом на корисну модель (№ 140923).

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно [1-2, 4, 9-11]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: проведення експериментальних досліджень фотодатчика визначення забрудненості молокопровідної лінії [3]; проведення чисельного моделювання режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки [5]; проведення експериментальних досліджень режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки [6,7]; розробка конструктивно-технологічної схеми автоматичної системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок [8].

Загальна частка участі в опублікованих у співавторстві працях становить більше 70 %, а в охорono-правових документах – 70 %.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались на II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Молодіжний науковий форум» (ВНАУ, м. Ладижин, 23-24.04.2019 р.), V Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва» (ТДСДС ІКСГП НААН, м. Тернопіль, 30.05.2019 р.), XIX Міжнародній науковій конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій» (УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, сmt. Дослідницьке, 13.09.2019 р.), XX Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (МНАУ, м. Миколаїв, 17-19.10.2019 р.), VIII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (ННЦ «ІМЕСГ», сmt. Глеваха, 2-27.12.2019 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Від науки до

практики: професійна підготовка фахівця в контексті потреб сучасного ринку праці» (ТПК ВНАУ, м. Вінниця, 12-13.03.2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях (4,9 у.д.а.), у тому числі: 6 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (3,6 у.д.а.); 1 публікація у закордонному виданні (0,6 у.д.а.); 4 тези у збірниках доповідей наукових конференцій (0,4 у.д.а.); 1 патент України на корисну модель (0,3 у.д.а.).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація викладена українською мовою, складається зі вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи становить 235 сторінок, у тому числі 16 додатків на 50 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 185 сторінок, містить 80 рисунків, 11 таблиць. Список використаних джерел нараховує 224 найменування на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі дослідження, представлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів наукових досліджень.

У першому розділі «Сучасний стан питання і вибір напрямів досліджень» наведено чинники і наслідки неефективного промивання молочно-доїльного обладнання, проведено аналіз техніко-технологічного забезпечення промивання доїльних установок та їхніх режимних параметрів і викладено відповідні теоретичні передумови дослідження процесу промивання.

Основи теорії мийної дії і технології очищення розроблені Ребіндером П. А. Дослідженнями проблеми промивання доїльних установок і процесів руху двофазних середовищ (рідина-повітря) займалися такі вчені: Фененко А. І., Карташов Л. П., Ведищев С. М., Дмитрів В. Т., Ушаков Ю. А., Харьков С. В., Палій А. П., Цой Ю. А., Жмирко А. М., Корольов А. С., Матвеев В. Б., Кирсанов В. В., Пунько А. І., Остроухов А. И., Мамедова Р. А., Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Reinemann, D. J. та інші.

У результаті аналізу процесу промивання доїльних установок (тривалість, температура і швидкість руху мийного розчину), існуючих конструкцій та класифікації техніко-технологічного забезпечення промивання встановлено, що найбільш ефективними є циркуляційні системи промивання із регульованим утворенням пробкового режиму з використанням повітряних інжекторів.

Інтенсифікація процесу промивання можлива за умови впровадження додаткового обладнання доїльних установок, що створюють складний динамічний рух двофазного мийного розчину на базі автоматичного керування, а саме: адаптивного режиму роботи до параметрів руху мийного розчину, ступеня очищення поверхонь молокопровідної системи на основі даних отриманих з контролюючих засобів оцінки їхнього стану.

Аналіз теоретичних і експериментальних передумов техніко-технологічного забезпечення промивання доїльних установок показав, що процес руху двофазного мийного розчину при пробковому режимі течії, який утворюється під дією повітряних і гідро- інжекторів, досліджено не достатньо. Тому необхідно більш детально дослідити зазначений процес і визначити відповідні закономірності, на основі яких можна створити алгоритм роботи системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок. З метою підвищення конкурентоздатності вітчизняного

виробника на світовому ринку базовою моделлю для проведення подальшого удосконалення обрано автомат промивки АП-03 виробництва ВАТ «Брацлав».

У другому розділі «Теоретичні дослідження процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки» наведені дослідження явища адгезії між молочними відкладеннями і поверхнею молокопровідної лінії, доповнено фізико-математичні апарати руху двофазного мийного розчину, явища гідравлічного удару для періодично працюючого повітряного інжектора, обґрунтовано режими його роботи, розроблено фізико-математичну модель роботи гідроінжектора системи промивання.

Процес промивання молокопровідних ліній передбачає подолання сили адгезії між молочними відкладеннями і поверхнею молокопровідної лінії (рис. 1), що описано математичним виразом:

$$F_w > F_c - F_g, \quad (1)$$

де  $F_w$  – сила Стокса, Н;  $F_g$  – проекція сили тяжіння на вісь молокопровідної лінії, Н;  $F_c$  – сила адгезії молочних відкладень, Н.

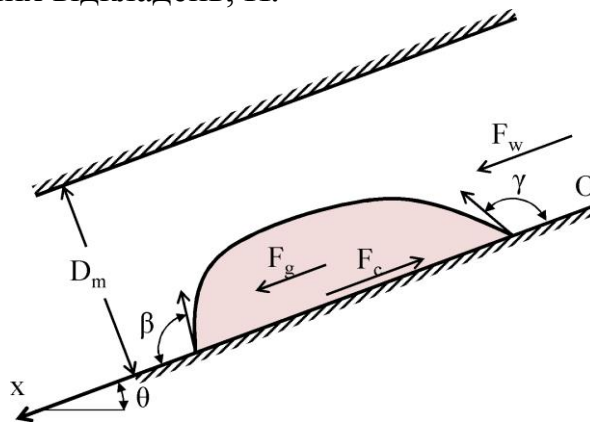


Рисунок 1 – Розрахункова схема дії сил на відкладення у вигляді краплі рідини молочного походження

Сила адгезії  $F_c$  молочних відкладень може бути описана наступним рівнянням:

$$F_c = c_f \sqrt{\frac{24 \sin^3 \beta (\cos \gamma - \cos \beta)^3 \sigma_{mf}^3}{\rho_m g (1 - \cos \beta)^2 (2 + \cos \beta) \sin \theta}}, \quad (2)$$

де  $\beta$ ,  $\gamma$  – краєві кути краплі молочного відкладення;  $\sigma_{mf}$  – поверхневий натяг краплі між мийним розчином і відкладенням, Н/м;  $\rho_m$  – густина відкладення, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\theta$  – кут нахилу молокопровідної лінії;  $c_f$  – емпіричний коефіцієнт (за дослідженнями Matsunaga T. та ін.  $c_f \approx 1,5$ ).

Розв'язуючи нерівність (1) отримано мінімально допустиму швидкість руху мийного розчину  $u_f$ , необхідну для подолання сили адгезії  $F_c$ :

$$u_f = \left[ \frac{(\pi - c_f) \sigma_{mf} (\cos \gamma - \cos \beta)}{c_{f2} \pi \sqrt{D_m \rho_f \mu_f}} \right]^{2/3}, \quad (3)$$

де  $u_f$  – швидкість руху мийного розчину, м/с;  $c_{f2}$  – емпіричні коефіцієнти (за дослідженнями Yuhashi N. та ін.  $c_{f2} \approx 1,8$ );  $D_m$  – діаметр молокопровідної лінії, м;  $\rho_f$  – густина мийного розчину, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_f$  – динамічна в'язкість мийного розчину, Па·с.

На рис. 2 показано залежність найменшої допустимої швидкості руху мийного розчину від фізико-механічних властивостей молочних відкладень для різних діаметрів молокопровідної лінії. Аналізуючи отримані залежності зроблено висновок, що при різних діаметрах молокопровідних ліній збільшення поверхневого натягу  $\sigma_{mf}$  між миючим розчином і молочними відкладенням призводить до збільшення значень найменшої допустимої швидкості  $u_f$ , що забезпечує подолання сили адгезії, від зміни значень краєвих кутів  $\beta$ ,  $\gamma$  швидкість  $u_f$  практично не залежить.

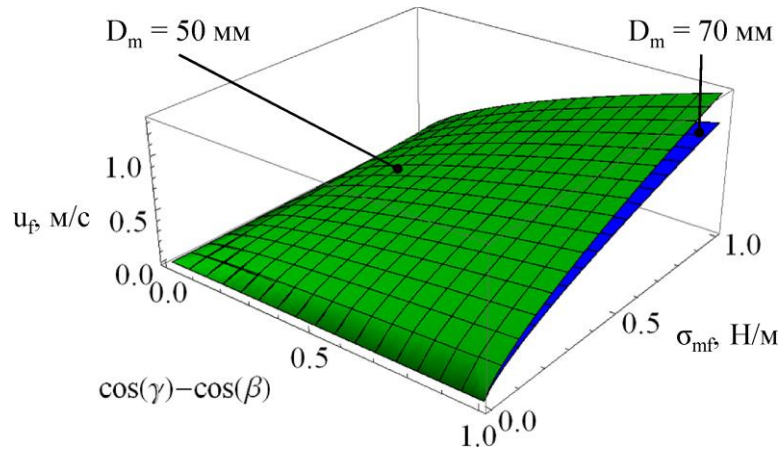


Рисунок 2 – Залежність найменшої допустимої швидкості руху мийного розчину від фізико-механічних властивостей молочних відкладень (краєвих кутів  $\beta$ ,  $\gamma$  і поверхневого натягу між миючим розчином і відкладенням  $\sigma_{mf}$ ) при різних діаметрах молокопровідної лінії  $D_m$

Фізико-математичний апарат руху двофазного мийного розчину молокопровідною лінією базується на відомих рівняннях принципу суперпозиції сил і, як наслідок, тисків, неперервності течії, законів збереження мас, імпульсу й енергії.

Для роздільної моделі переміщення двофазного мийного розчину молокопровідною лінією із запропонованим повітряним інжектором перепад тиску (градієнт тиску) становить:

$$\begin{aligned}
 -\left(\frac{dp_g}{dz}\right) &= \frac{2f_{F0}\rho_g u_g^2}{D} \left[ 1 + \frac{W_g \rho_g}{(W_g + W_f)(\rho_g \alpha + \rho_f (1 - \alpha))} \right] \frac{2W_g \mu_f + W_f \mu_g}{W_g \mu_f + W_f \mu_g} + \\
 &+ 2\rho_g^2 u_g^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{W_g}{W_g + W_f} \right) \left( \frac{W_g}{\rho_g \alpha (W_g + W_f)} - \frac{W_f}{\rho_f (1 - \alpha) (W_g + W_f)} \right) + \\
 &+ \frac{\rho_g^2 u_g^2}{(W_g + W_f)^2} \frac{d\alpha}{dz} \left( \frac{W_f^2}{\rho_f (1 - \alpha)^2} - \frac{W_g^2}{\rho_g \alpha^2} \right) + g\rho_g \alpha \sin \theta; \\
 -\left(\frac{dp_f}{dz}\right) &= \frac{2f_{F0}\rho_f u_f^2}{D} \left[ 1 + \frac{W_f}{W_g + W_f} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g \alpha + \rho_f (1 - \alpha)} \right) \right] \frac{W_g \mu_f + 2W_f \mu_g}{W_g \mu_f + W_f \mu_g} + \\
 &+ 2\rho_f^2 u_f^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{W_f}{W_g + W_f} \right) \left( \frac{W_f}{\rho_f \alpha (W_g + W_f)} - \frac{W_g}{\rho_g (1 - \alpha) (W_g + W_f)} \right) + \\
 &+ \frac{\rho_f^2 u_f^2}{(W_g + W_f)^2} \frac{d\alpha}{dz} \left( \frac{W_g^2}{\rho_g (1 - \alpha)^2} - \frac{W_f^2}{\rho_f \alpha^2} \right) + g\rho_f (1 - \alpha) \sin \theta,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де індекси «g» і «f» відносяться до повітря і рідини відповідно;  $p$  – тиск, Па;



$z$  – координата вздовж молокопровідної лінії, м;  $f_{F0}$  – коефіцієнт тертя, який визначається як функція числа Рейнольдса ( $Re = \rho u D / \mu$ ) і відносної шорсткості труби ( $\varepsilon/D$ );  $\varepsilon$  – абсолютна шорсткість молокопровідної лінії, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – густина фази, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – швидкість фази, м/с;  $\mu$  – динамічна в'язкість фази, Па·с;  $D$  – діаметр молокопровідної лінії, м;  $\theta$  – кут нахилу молокопровідної лінії відносно горизонту;  $\alpha$  – частка повітря в області молокопровідної лінії;  $W$  – масові витрати фаз, кг/с. Повітряний інжектор забезпечує періодичну подачу повітряного потоку в молокопровідну лінію, тобто граничні масові витрати фаз при  $z = 0$  такі:

$$W_f|_{z=0} = \text{const};$$

$$W_g(t)|_{z=0} = \begin{cases} 0, & nt_{inj} + nt_p \leq t \leq nt_{inj} + (n+1)t_p, n \in N; \\ W_g|_{z=0} = \text{const}, & nt_{inj} + (n+1)t_p \leq t \leq (n+1)t_{inj} + (n+1)t_p, n \in N, \end{cases} \quad (5)$$

де  $t_{inj}$  – тривалість такту впуску повітряного інжектора, с;  $t_p$  – тривалість паузи повітряного інжектора, с;  $W_g|_{z=0}$  – граничний масовий потік повітря при  $z = 0$ , кг/с;  $W_f|_{z=0}$  – граничний масовий потік мийного розчину при  $z = 0$ , кг/с.

Оскільки система диференціальних рівнянь (4)–(5) є досить складною для аналітичного розрахунку, так як містить періодичну функцію масового потоку повітря, тому дослідження переміщення двофазного мийного розчину молокопровідною лінією доїльної установки із повітряним інжектором (рис. 3) проводилося з використанням програмного пакету STAR-CCM+ на основі фізичних моделей: багатофазна взаємодія, ізотермічне рівняння енергії рідини, поле сили тяжіння, к-ε модель турбулентності, усереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, багатофазне рівняння стану, об'єм рідини (VOF), Ейлерова багатофазність.

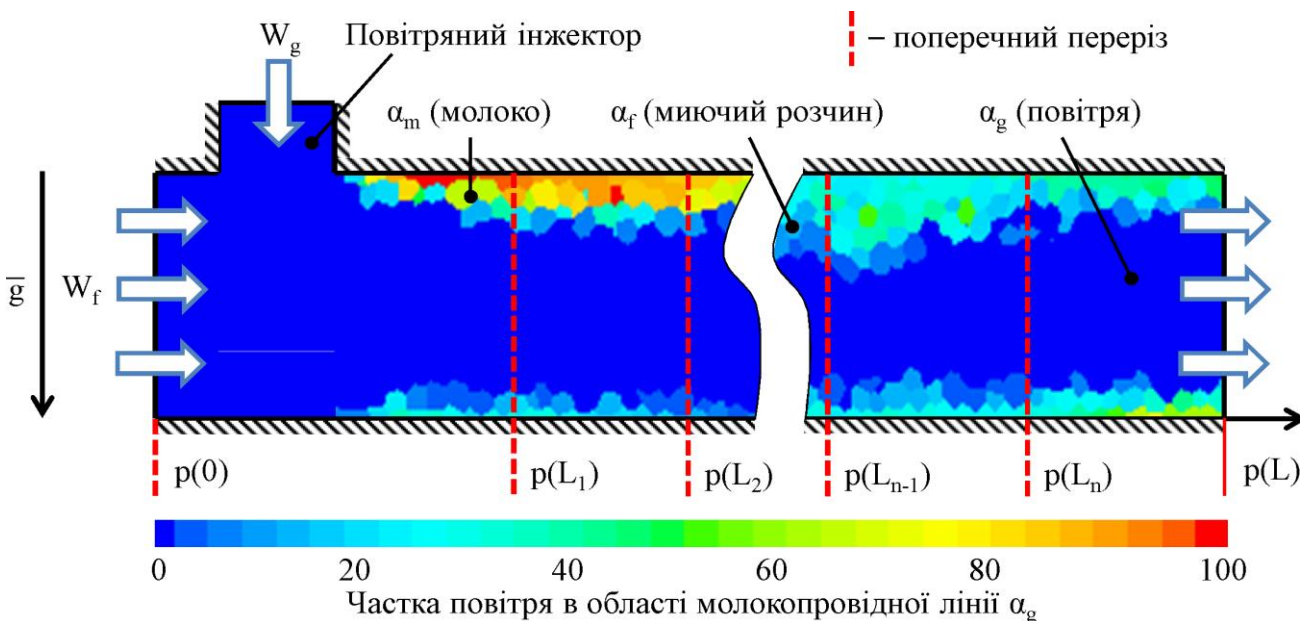


Рисунок 3 – Модель процесу руху багатофазного середовища горизонтальною молокопровідною лінією доїльної установки із повітряним інжектором, отримана в програмному пакеті STAR-CCM+  
Дослідження проводилися для варіантів, коли інжектор періодично

відкривається (1с і 9 с) і закривається (1с і 9 с). Відкритий інжектор сполучає внутрішній об'єм молокопровідної лінії з атмосферним тиском і впускає повітря. В процесі чисельного моделювання визначали динаміку вакуумметричного тиску в поперечних перерізах на відстані від лівої границі  $p(0\text{ м})$ ,  $p(1\text{ м})$ ,  $p(2\text{ м})$ ,  $p(3\text{ м})$ ,  $p(4\text{ м})$ ,  $p(5\text{ м})$  і динаміку вмісту компонентів багатозфазного середовища: мийного розчину  $\alpha_f$ , повітря  $\alpha_g$ , молоко  $\alpha_m$  (див. рис. 3).

Факторами чисельного моделювання були діаметр молокопроводу  $D_m$  (50-70 мм), робочий вакуумметричний тиск  $p_w$  (45-75 кПа), тривалість такту впуску повітряного інжектора  $t_{inj}$  (1-9 с), тривалість паузи повітряного інжектора  $t_p$  (1-9 с).

У результаті чисельних досліджень отримано графічні залежності зміни вмісту компонентів багатозфазного середовища в молокопровідній лінії в залежності від режимів роботи повітряного інжектора (рис. 4). На графіках видно, що в початковий момент часу (від 0 с до 16 с) весь об'єм горизонтальної прямолінійної молокопровідної лінії заповнений молоком, тобто  $\alpha_m = 100\%$ . При цьому вакуумметричний тиск становив  $p = 45\text{ кПа}$ . З 21,6 с потік повітря в програмі становить  $W_f = 0,001\text{ кг/с}$ , вакуумметричний тиск є сталим, а патрубок інжектора повністю закритий.

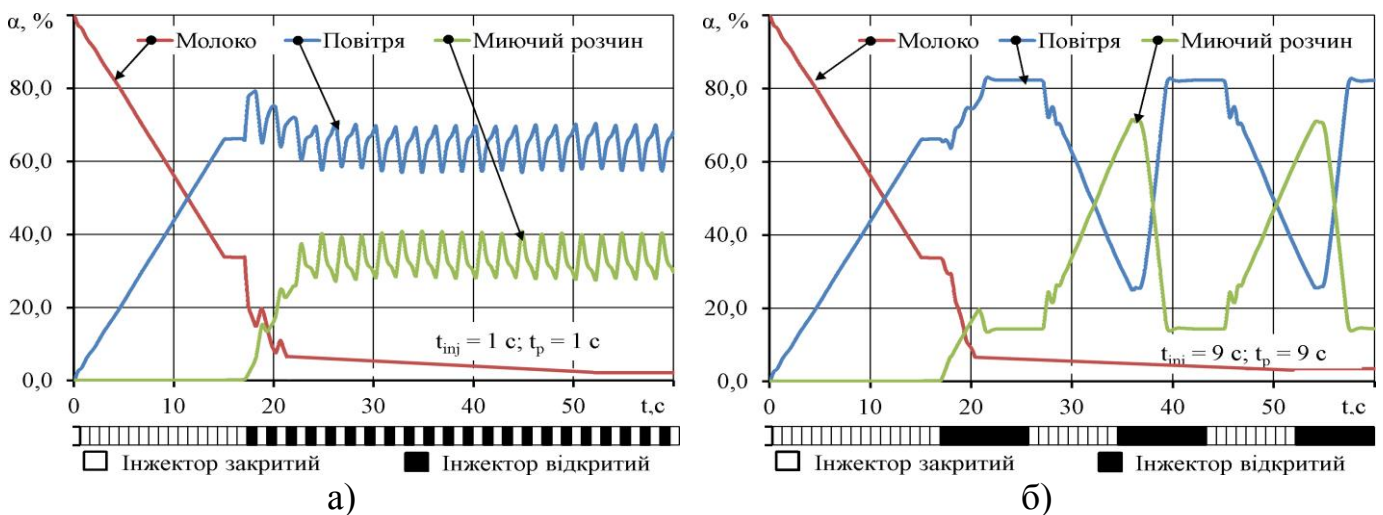


Рисунок 4 – Динаміка зміни вмісту компонентів багатозфазного середовища в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с (а) і 9 с (б)

Через 16 с (час підбирався за умови стабілізації вмісту молока і повітря в об'ємі молокопровідної лінії) потік повітря припинявся  $W_f = 0\text{ кг/с}$ . Замість нього на лівій границі було реалізовано масовий потік мийного розчину  $W_f = 0,2\text{ кг/с}$ . При цьому інжектор протягом всього процесу періодично відкривається і закривається з інтервалами в 1с (рис.4, а) та 9 с (рис.4, б). На 21,6 с (рис. 4, а) та 20,5 с (рис.4, б) і далі значення вмісту молока стабілізується і становить  $\alpha_m = 2,1\%$  та  $\alpha_m = 3,5\%$  відповідно. Це свідчить про наявність молока на стінках молокопровідної лінії із середньої товщиною шару 0,27 мм (0,43 мм).

Залежність вакуумметричного тиску від режимів роботи повітряного інжектора представлено на рис. 5. При кожному відкритті інжектора молокопровідна лінія сполучається з атмосферним тиском і вакуумметричний тиск по всіх областях спочатку зменшується до значення  $-39,7\text{ кПа}$  ( $-137,1\text{ кПа}$ ) для варіанту з інтервалом

в 1 с (9 с), а потім різко збільшується до значення 91,2 кПа (72,2 кПа). Різка зміна тиску (0,1–0,6 с) спричиняє періодичні гідроудари, що чинять вплив на зменшення адгезії молока на поверхні молокопровідної лінії. Аналіз рис. 5 дозволив зробити висновок про зменшення коливань вакууметричного тиску при віддалені від інжектора до значення 2,5 кПа, що відповідає вимогам ISO 5707 і ISO 6690. На основі цього розрахована найменша відстань  $L$  між інжекторами, яка становить 12,8 м.

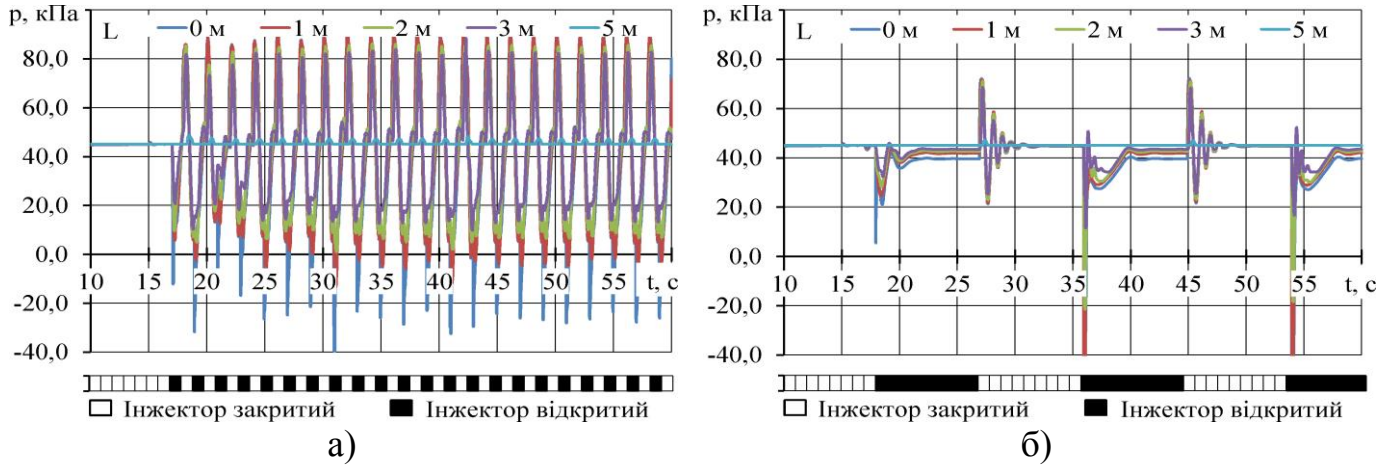


Рисунок 5 – Динаміка зміни вакууметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с (а) і 9 с (б)

Розповсюдження ударної хвилі, що створюється миттєвим відкриттям і закриттям інжектора, проілюстроване на графіках зміни швидкості двофазного мийного розчину (рис. 6). Після відкриття повітряного інжектора швидкість мийного розчину різко збільшується до значення 5,2 м/с за 0,34 с.

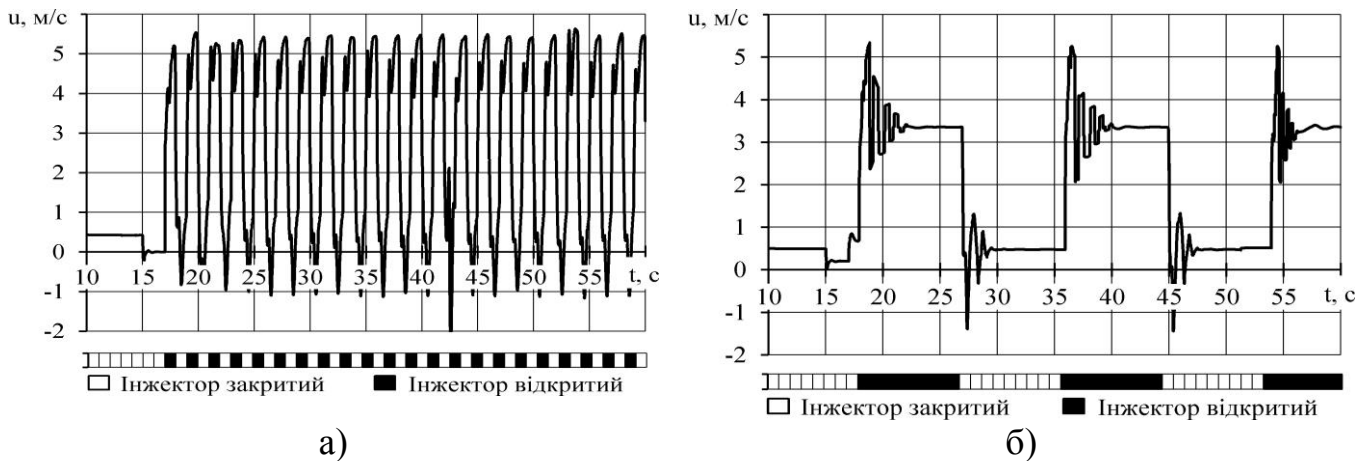


Рисунок 6 – Динаміка зміни швидкості двофазного мийного розчину в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с (а) і 9 с (б)

Далі швидкість руху мийного розчину виконуючи затухаючі коливання, зменшується до значення 3,3 м/с. Це свідчить про створення позитивної ударної хвилі, яка рухається в напрямку руху мийного розчину. Після закриття повітряного інжектора швидкість мийного розчину зменшується до 0 і змінює свій знак на протилежний (–1,3 м/с), що свідчить про зворотній рух розчину, після чого знову збільшується за напрямом руху. Характер зміни швидкості має вигляд затухаючих

коливань. Це призводить до утворення негативної ударної хвилі, яка переміщується вздовж молокопровідної лінії проти напрямку руху мийного розчину.

Раціональні режими роботи системи промивання молокопроводів доїльного обладнання із повітряним інжектором можна досягти за умови мінімізації значення товщини шару молока на стінці молокопроводу  $h_m$  і швидкості зміни тиску  $\Delta p/\Delta t$ .

$$\begin{cases} h_m(D_m, p_w, t_{inj}, t_p) \rightarrow \min, \\ \frac{\Delta p}{\Delta t}(D_m, p_w, t_{inj}, t_p) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (6)$$

де  $h_m$  – товщина шару молока на стінці молокопроводу, мм (якісний критерій оцінки роботи системи промивання молокопроводів із повітряним інжектором):

$$h_m = D_m \left(1 - \sqrt{1 - \alpha_m/100}\right)/2. \quad (7)$$

$\Delta p/\Delta t$  – швидкість зміни тиску, кПа/с (критерій, який обмежує режимні параметри роботи системи промивання із повітряним інжектором через ймовірність виникнення «некерованого» гідродару):

$$\Delta p/\Delta t = (p_{\max} - p_{\min})/(t_{inj} + t_p). \quad (8)$$

Моделювання проводилося шляхом перебору параметрів досліджень із загальною кількістю  $3^4 = 81$  дослідів.

У результаті чисельного моделювання і подальшої обробки отриманих даних в програмному пакеті Mathematica отримано залежності зміни значення товщини шару молока та тиску за час такту впуску і паузи повітряного інжектора (швидкість зміни тиску) від факторів досліджень у вигляді:

$$\begin{aligned} h_m = & 0,8738 - 0,03783 D_m + 0,0006099 D_m^2 + 0,01365 p_w - 0,0004881 D_m p_w + \\ & + 0,0001357 p_w^2 - 0,0228 t_{inj} + 0,000114 D_m t_{inj} + 0,00285 t_{inj}^2 - 0,03245 t_p + \\ & + 0,000305 D_m t_p - 0,00114 t_{inj} t_p + 0,00381 t_p^2. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta p/\Delta t = & 37,6294 - 0,22691 D_m + 1,7582 p_w - 0,007633 p_w^2 - \\ & - 15,379 t_{inj} - 0,073743 p_w t_{inj} + 1,01054 t_{inj}^2 - 3,3746 t_p - \\ & - 0,044291 p_w t_p + 0,92582 t_{inj} t_p - 0,087265 t_p^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6) у програмному пакеті Mathematica отримуємо раціональні параметри режимів роботи інжектора: для  $D = 50$  мм:  $p_w = 45,0$  кПа,  $t_{inj} = 3,8$  с,  $t_p = 2,9$  с,  $h_m = 0,243$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 27,38$  кПа/с; для  $D = 60$  мм:  $p_w = 57,5$  кПа,  $t_{inj} = 3,6$  с,  $t_p = 2,5$  с,  $h_m = 0,306$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 35,32$  кПа/с; для  $D = 70$  мм:  $p_w = 74,5$  кПа,  $t_{inj} = 3,4$  с,  $t_p = 2,1$  с,  $h_m = 0,406$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 43,42$  кПа/с.

Для інтенсифікації процесу промивання іншого обладнання (молокозбірники, групові та індивідуальні лічильники молока, тощо), яке має складну геометрію та наявність застійних зон пропонується використовувати гідроінжектор, що представляє насадку із отвором круглої форми, через яку під тиском подається мийний розчин. На рис. 7 наведена схема зміни структури струменя мийного розчину, створеного гідроінжектором залежно від відстані до сопла.

Розроблено фізико-математичну модель (11)-(13) процесу роботи гідроінжектора системи промивання, що створює струмінь мийного розчину направленої дії для очищення внутрішніх поверхонь молокопровідної системи. У результаті теоретичних досліджень отримано залежності радіуса області удару



струменя  $R_a$  і його тиску на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  від внутрішнього діаметра насадки  $d_n$ , відстані до неї  $H_j$  при різних значеннях тиску на виході насадки  $p_n$

$$F_a > F_c, \quad F_a = p_a \pi R_a^2; \quad (11)$$

$$R_a = (3,4ax + 0,5d_n)^2 \frac{2ax + 0,29d_n}{3,84a^2 x^2}; \quad (12)$$

$$p_a = p_n \left( \frac{1,92a^2 x^2 d_n}{(3,4ax + 0,5d_n)^2 (2ax + 0,29d_n)} \right)^2, \quad (13)$$

де  $F_a$  – розрахункова сила дії струменя мийного розчину, кПа;  $R_a$  – радіус області удару струменя, м;  $p_a$  – тиск струменя на поверхню молокопровідної системи, Па;  $p_n$  – тиск на виході насадки, Па;  $a$  – коефіцієнт структури струменя (за дослідженнями Абрамовича Г. Н. для осі симетричних струменів  $a \approx 0,007$ );  $d_n$  – внутрішній діаметр насадки, м;  $x$  – відстань від початкового перетину струменя, м.

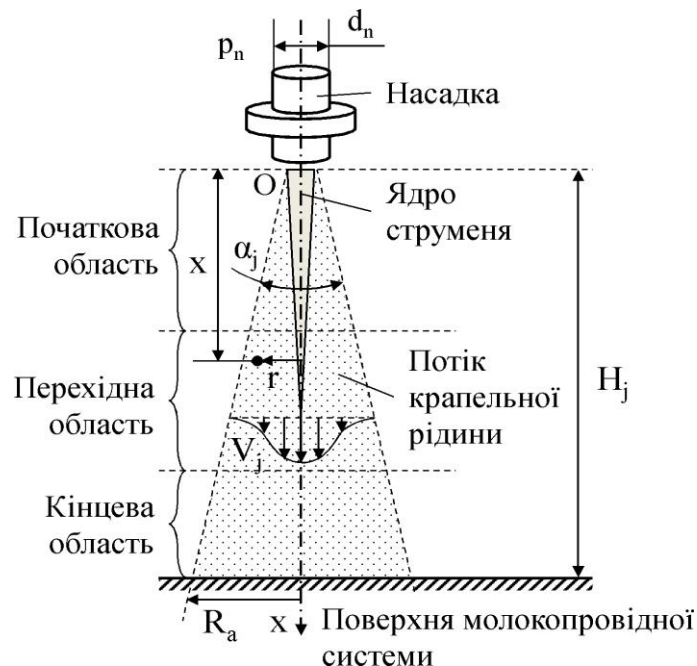


Рисунок 7 – Схема зміни структури струменя мийного розчину з віддаленням від сопла

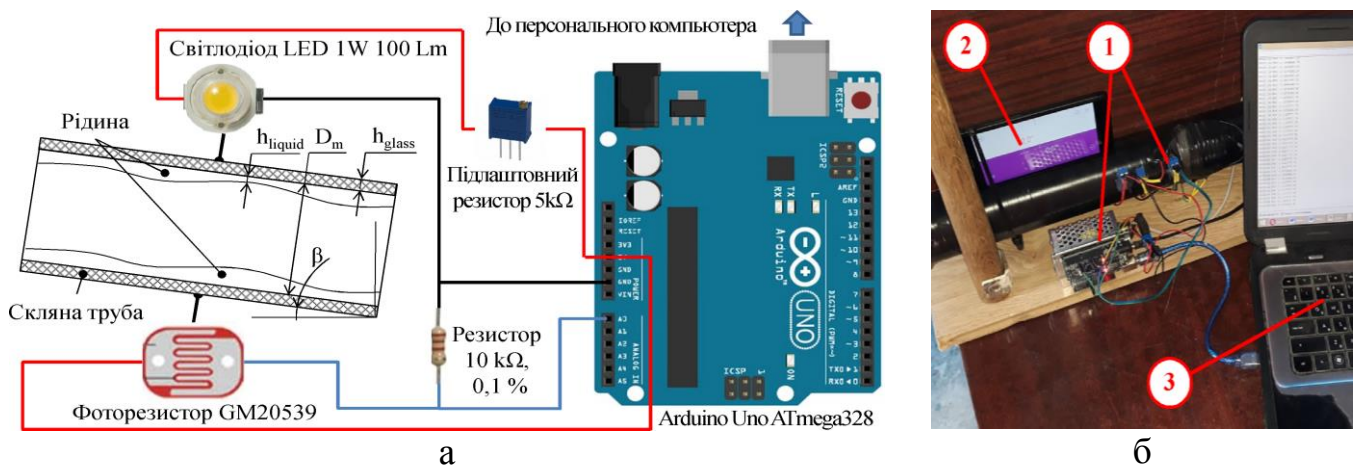
Для ефективної роботи гідроінжектора необхідно, щоб тиск на виході насадки  $p_n$  був максимальним, що забезпечено молочним насосом відцентрового типу низького тиску ( $\approx 3$  атм.). При цьому  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 0,166$  м,  $R_a = 0,0236$  м,  $p_a = 42,0$  кПа.

Такі параметри відповідають умові руйнування молочних відкладень (11). Розрахункова сила дії струменя мийного  $F_a = 74$  Н перевищує значення сили адгезії краплі молочного відкладення на поверхні молокопровідної системи  $F_c = 42$  Н, що розраховано за формулою (2).

У третьому розділі «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» надано програму та методику визначення забрудненості молокопровідної лінії і досліджень режимів роботи повітряного і гідроінжекторів. Метою досліджень є перевірка адекватності математичних моделей переміщення двофазного мийного розчину молокопровідною лінією доїльної установки та оцінка достовірності теоретично отриманих залежностей впливу режимних і технологічних

параметрів техніко-технологічного забезпечення системи промивання на ефективність процесу очищення доїльних установок.

Основним елементом обладнання для автоматичного визначення забрудненості молокопроводної лінії доїльної установки є фотодатчик, схема і загальний вигляд якого представлено на рис. 8.



1 – фотодатчик; 2 – цифровий кутомір; 3 – персональний комп'ютер  
Рисунок 8 – Схема фотодатчика (а) і загальний вигляд обладнання (б) для визначення залежності інтенсивності світла від товщини шару молока

Обладнання працює таким чином: скляна труба заповнюється середовищем (повітря, молоко, мийний розчин), вмикається світлодіод, світло від якого проходить крізь стінки скляної труби і середовище та потрапляє на фоторезистор. При цьому опір фоторезистора змінюється і фіксується пристроєм Arduino Uno ATmega328. Отримані дані через кожні 2с передаються на ПЕОМ. Оскільки фоторезистор обернено пропорційно змінює свій опір  $R$  залежно від інтенсивності світла  $I$ , то товщина шару молока на стінках фотодатчика визначається

$$h_{\text{milk}} = k_{\lambda, \text{milk}}^{-1} \ln(R_2 / R_1), \quad (14)$$

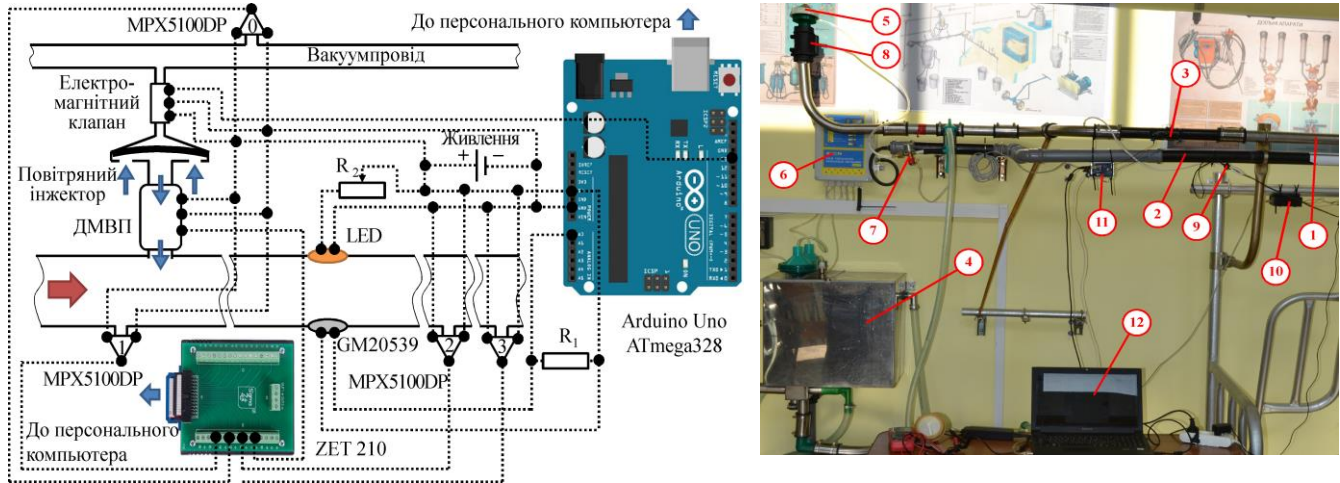
де  $R_2$  – поточне значення опору на фотодатчику, Ом;  $R_1$  – початкове значення опору на фотодатчику, Ом;  $k_{\lambda, \text{milk}}$  – показник поглинання світла молоком,  $\text{м}^{-1}$ .

Експериментальні дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів проведені на експериментальному стенді на базі лабораторної доїльної установки з верхнім і нижнім молокопроводами із апаратом промивки виробництва ТДВ «Брацлав». Схема експериментального стенду і його загальний вигляд представлено на рис. 9.

Факторами експериментальних досліджень є робочий вакуумметричний тиск  $p_w$  (45-75кПа), тривалість такту впуску повітряного інжектора  $t_{\text{inj}}$  (1-9 с), тривалість паузи повітряного інжектора  $t_p$  (1-9 с) і об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_v$  (100-300 л/хв).

Робочий вакуумметричний тиск  $p_w$  встановлюється на лабораторній доїльній установці з використанням вакуумрегулятора і контролюється датчиком вакуумметричного тиску MPX5100DP. Похибка вимірювання вакуумметричного тиску в межах досліджуваного діапазону становить  $\pm 0,1$  кПа. Тривалості тактів впуску  $t_{\text{inj}}$  і паузи  $t_p$  повітряного інжектора встановлюються за допомогою електромагнітного клапана, який приєднано до плати керування Arduino Uno

ATmega328. Похибка тактів впуску і паузи складає  $\pm 1$ мс. Об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_V$  встановлюються шляхом перекривання отворів на повітряному інжекторі і контролюється датчиком масових витрат повітря ДМВП BOSCH 280218037. У процесі експериментальних досліджень визначали динаміку вакуумметричного тиску на кожному з підключених датчиків ( $p_0, p_1, p_2, p_3$ ) і динаміку зміни опору на фотодатчику  $R_f$ .



- 1 – молокопровідна система; 2 – вакуумна система; 3 – фотодатчик визначення забрудненості молокопровідної лінії; 4 – бак з мийним розчином; 5 – повітряний інжектор; 6 – автомат промивки; 7 – електромагнітний клапан; 8 – датчик масових витрат повітря ДМВП; 9 – датчик вакуумметричного тиску MPX5100DP; 10 – модуль АЦП/ЦАП ZET 210; 11 – плата керування Arduino Uno ATmega328; 12 – персональний комп'ютер

Рисунок 9 – Схема і загальний вигляд експериментального стенду для дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки

Якісним критерієм оцінки досліджень режимів роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки із повітряним інжектором є ступінь чистоти  $\theta_{\text{milk}}$ , яка визначається як зміна середнього значення товщина шару молока  $h_{\text{milk}}$  на стінці труби:

$$\theta_{\text{milk}} = (h'_{\text{milk}} - h''_{\text{milk}}) / h'_{\text{milk}} \cdot 100 \% , \quad (15)$$

де  $h'_{\text{milk}}$  – початкове значення товщини шару молока на стінці труби, м;  $h''_{\text{milk}}$  – кінцеве значення товщини шару молока на стінці труби, м.

Відповідно до проведених лабораторних досліджень товщина шару молока на стінці труби визначалася з урахуванням значення опору на фотодатчику за формулою (14).

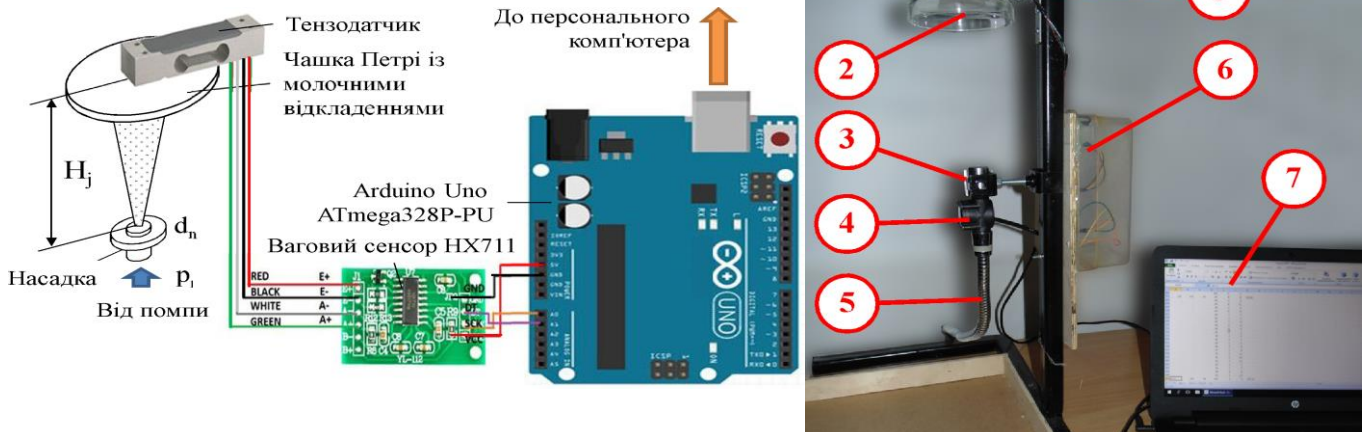
Критерієм, який обмежує режимні параметри роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки із повітряним інжектором, є значення зміни тиску за час такту впуску і паузи повітряного інжектора (швидкість зміни тиску)  $\Delta p / \Delta t$ , яке розраховується за формулою (8). Експериментальні дослідження проводилися за планом Хартлі-Коно ( $H_4-K_4$ ) для чотирьох факторів на трьох рівнях із загальною кількістю дослідів – 18. Далі з використанням програмного пакету Mathematica визначалася модель регресії другого порядку для кожного із



запропонованих критеріїв.

Для перевірки адекватності результатів теоретичного дослідження роботи гідроінжектора системи промивання створено відповідне лабораторне обладнання, схема та загальний вигляд якого наведено на рис. 10.

Факторами експериментальних досліджень є тиск на виході насадки  $p_n$  (200-500 кПа), внутрішній діаметр насадки  $d_n$  (1-3 мм), відстань між насадкою і поверхнею  $H_j$  (0,1-0,3 м), тривалість дії струменя на поверхню насадки  $t_n$  (10-30 хв).



1 – тензодатчик; 2 – чашка Петрі; 3 – насадка; 4 – датчик тиску; 5 – трубопровід;  
6 – Arduino Uno ATmega328P-PU; 7 – персональний комп'ютер

Рисунок 10 – Схема і загальний вигляд експериментального стенду для дослідження робочого органу гідроінжектора системи промивання (насадки із отвором круглої форми)

Тиск на виході насадки  $p_n$  встановлюється за допомогою зміни напруги на помпі PLD1206 (800 кПа, 12 В) і контролюється гідравлічним манометром. Внутрішній діаметр насадки  $d_n$  встановлюється шляхом заміни жиклерів із відповідним відкаліброваним діаметром отвору. Відстань між насадкою і поверхнею  $H_j$  контролюється лінійкою. Тривалість дії струменя на поверхню насадки  $t_n$  визначається секундоміром. Перед початком експериментальних досліджень в чашках Петрі сформовані молочні відкладення шляхом відстоювання молока протягом 30 діб при температурі 15-25°C. Ефективність очищення поверхні чаші Петрі визначалась співвідношенням її маси до обробки струменем мийного розчину і після його дії, при чому сила струменя відповідала розрахунковим показникам  $F_a = 74$  Н. У якості критерію оцінки ефективності процесу промивання визначено ступінь очищення поверхні (чашки Петрі) від молочного відкладення  $\chi$ :

$$\chi = (m'_{\text{Petri}} - m''_{\text{Petri}}) / (m'_{\text{Petri}} - m_{\text{Petri}}) \cdot 100 \%, \quad (16)$$

де  $m_{\text{Petri}}$  – маса пустої чашки Петрі, кг;  $m'_{\text{Petri}}$  – маса чашки Петрі із молочним відкладенням до промивання, кг;  $m''_{\text{Petri}}$  – маса чашки Петрі із молочним відкладенням після промивання, кг.

Експериментальні дослідження проводилися за планом Бокса-Бенкіна ( $BB_3$ ) для трьох факторів (тиск на виході насадки  $p_n$ , внутрішній діаметр насадки  $d_n$ , відстань між насадкою і поверхнею  $H_j$ ) на трьох рівнях із загальною кількістю дослідів – 15. Далі з використанням програмного пакету Mathematica визначалась модель регресії другого порядку для кожного із запропонованих критеріїв.



У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведено результати експериментальних досліджень режимів роботи повітряного і гідроінжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки, проведено їх порівняння з результатами чисельного моделювання.

У результаті експериментальних досліджень режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки і подальшої обробки отриманих даних в програмному пакеті Mathematica отримана залежність зміни ступеня чистоти  $\theta_{\text{milk}}$  від факторів досліджень у вигляді:

$$\theta_{\text{milk}} = 29,587 + 1,4239 p_w - 0,01554 p_w^2 + 0,06405 Q_V - 0,0000718 p_w Q_V + 0,00011 Q_V^2 - 0,1219 t_{\text{inj}} - 0,00398 p_w t_{\text{inj}} + 0,000214 Q_V t_{\text{inj}} - 0,0803 t_{\text{inj}}^2 + 1,647 t_p - 0,00567 p_w t_p + 0,00148 Q_V t_p + 0,1298 t_{\text{inj}} t_p - 0,3895 t_p^2. \quad (17)$$

Максимальне значення ступеня чистоти молокопроводу  $\theta_{\text{milk}} = 94,0 \%$  досягається при  $p_w = 45,5$  кПа,  $t_{\text{inj}} = 1,1$  с,  $t_p = 3,2$  с,  $Q_V = 300$  л/хв.

Перерахунок рівняння (9), що отримане в результаті чисельного моделювання, за формулою (15) дає змогу визначити теоретичну залежність зміни ступеня чистоти  $\theta_{\text{milk}}$  від факторів досліджень:

$$\theta_{\text{milk}} = 12,614 + 3,78379 D_m - 0,0609942 D_m^2 - 1,3656 p_w + 0,048814 D_m p_w - 0,01357 p_w^2 + 2,288 t_{\text{inj}} - 0,01143 D_m t_{\text{inj}} - 0,28575 t_{\text{inj}}^2 + 3,2454 t_p - 0,030514 D_m t_p + 0,114 t_{\text{inj}} t_p - 0,3814 t_p^2. \quad (18)$$

Графічна інтерпретація експериментальної залежності (17) при  $D_m = 50$  мм і теоретичної залежності (18) при  $Q_V = 100$  л/хв представлена на рис. 11 а, б.

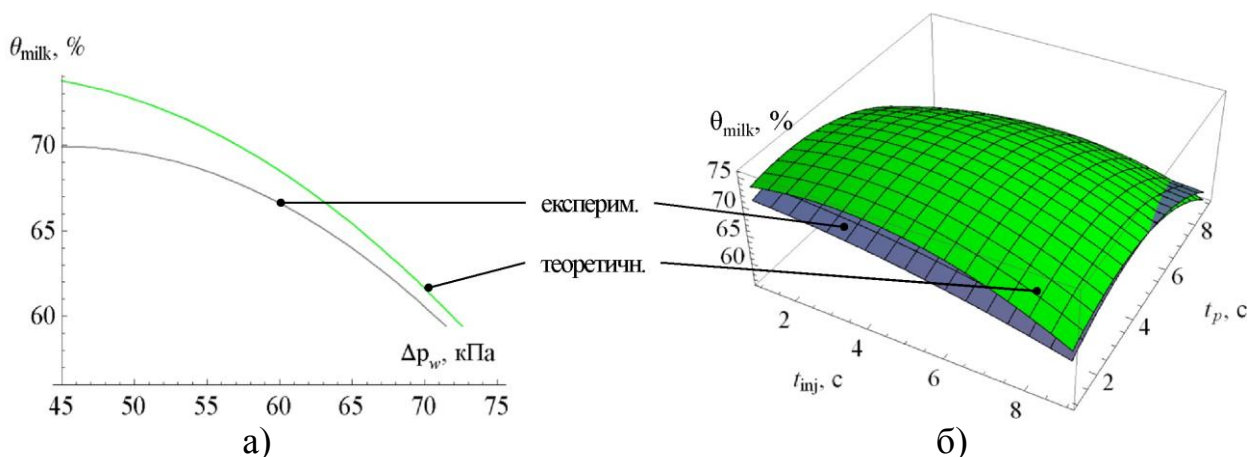


Рисунок 11 – Залежність ступеня чистоти молокопроводу  $\theta_{\text{milk}}$ : а – від робочого вакуумметричного тиску  $p_w$ , б – від тривалості такту впуску  $t_{\text{inj}}$  і тривалості паузи  $t_p$  повітряного інжектора

Порівнюючи експериментальну (17) і теоретичну (18) залежності за критерієм Фішера  $F = 1,88 < F_{0,05}(17;26) = 2,04$ , коефіцієнтом кореляції Пірсона  $r = 0,98$  і коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,96$ , можна стверджувати про адекватність теоретичних досліджень.

В результаті експериментальних досліджень аналогічним шляхом отримана залежність зміни тиску за час такту впуску і паузи повітряного інжектора (швидкість зміни тиску) від факторів досліджень:

$$\Delta p / \Delta t = -9,25598 + 2,04533 p_w - 0,0117884 p_w^2 + 0,145057 Q_V - 12,0428 t_{\text{inj}} - 0,0504414 p_w t_{\text{inj}} + 0,796128 t_{\text{inj}}^2 - 4,45978 t_p - 0,0270083 p_w t_p + 0,812068 t_{\text{inj}} t_p. \quad (19)$$

Мінімальне значення швидкості зміни тиску  $\Delta p/\Delta t = 6,93$  кПа/с досягається при  $p_w = 45$  кПа,  $t_{inj} = 4,39$  с,  $t_p = 1,0$  с,  $Q_v = 100$  л/хв. Графічна інтерпретація теоретичної залежності (10) при  $D_m = 50$  мм і експериментальної залежності (19) при  $Q_v = 100$  л/хв представлена на рис. 12 а, б.

Порівнюючи теоретичну (10) і експериментальну (19) залежності за критерієм Фішера  $F = 1,15 < F_{0,05}(17;26) = 2,04$ , коефіцієнтом кореляції Пірсона  $r = 0,99$  і коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,98$  можна стверджувати про адекватність теоретичних досліджень.

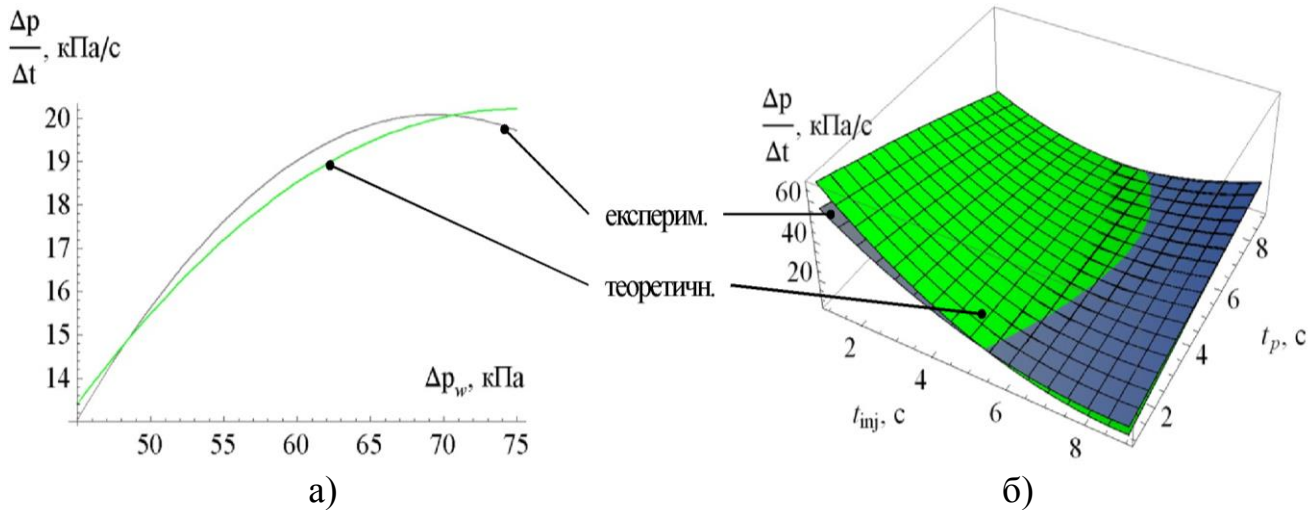


Рисунок 12 – Залежність швидкості зміни тиску  $\Delta p/\Delta t$ :

а – від робочого вакуумметричного тиску  $p_w$ , б – від тривалості такту впуску  $t_{inj}$  і тривалості паузи  $t_p$  повітряного інжектора

Обробка в програмному пакеті Mathematica результатів експериментальних досліджень режимів роботи гідроінжектора дозволила отримати рівняння регресії впливу досліджуваних факторів на силу дії струменя мийного розчину на поверхню  $F_a$ :

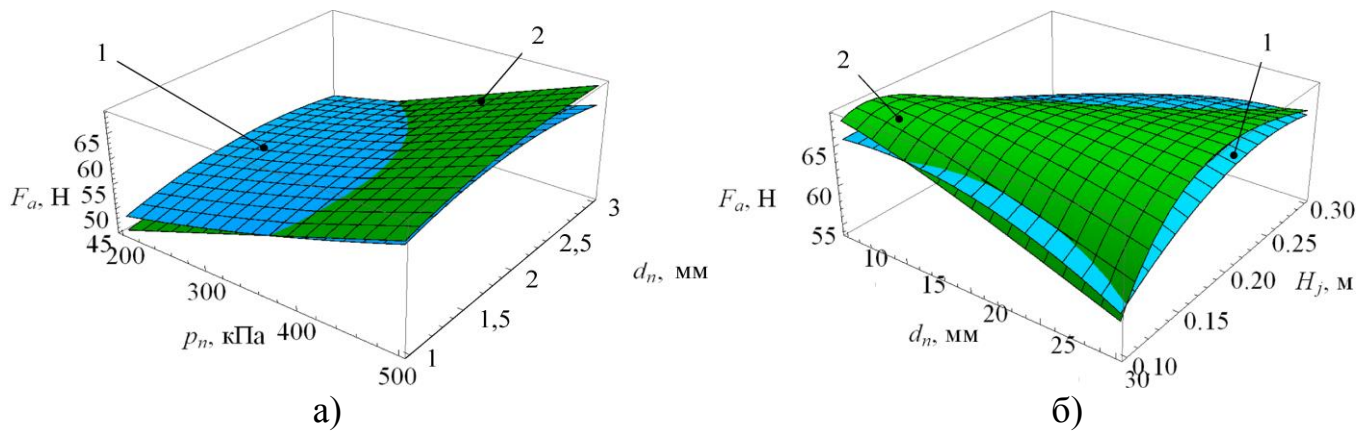
$$F_a = 36,9444 - 2,79158 d_n^2 + 37,4935 H_j - 349,488 H_j^2 + 4,47673 d_n + 45,3155 H_j d_n - 0,00305 p_n d_n + 0,0266784 p_n + 0,0000423704 p_n^2. \quad (20)$$

Максимальне значення сили дії струменя мийного розчину на поверхню  $F_a = 67,3$  Н досягається при  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 2,03$  мм,  $H_j = 0,1855$  м. На рис. 13 а, б наведено залежності сили струменя мийного розчину на поверхню  $F_a$  від факторів досліджень отриманих теоретично та експериментально, порівняльна оцінка яких, дозволяє стверджувати про адекватність і логічність отриманих залежностей (за критерієм Фішера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  і коефіцієнтом кореляції  $R = 0,97$ ).

У результаті обробки даних в програмному пакеті Mathematica отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на ступінь очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$  мала вигляд

$$\chi = -3,88822 - 3,87887 d_n^2 + 90,6127 H_j - 352,624 H_j^2 + 14,5026 d_n + 25,2184 H_j d_n - 0,0115165 p_n d_n + 0,0376324 p_n + 0,564674 t_n - 0,00898557 t_n^2. \quad (21)$$

Максимальне значення ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi = 40,1$  % досягається при  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 1,75$  мм,  $H_j = 0,191$  м. Фіксуючи по чергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовано на рис. 14 графічні інтерпретації експериментальної залежності (21).



1 – експериментальна залежність; 2 – теоретична залежність  
 Рисунок 13 – Залежність сили дії струменя мийного розчину на поверхню  $F_a$ :  
 а – від тиску на виході насадки  $p_n$ , її внутрішнього діаметра  $d_n$ ;  
 б – від відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$

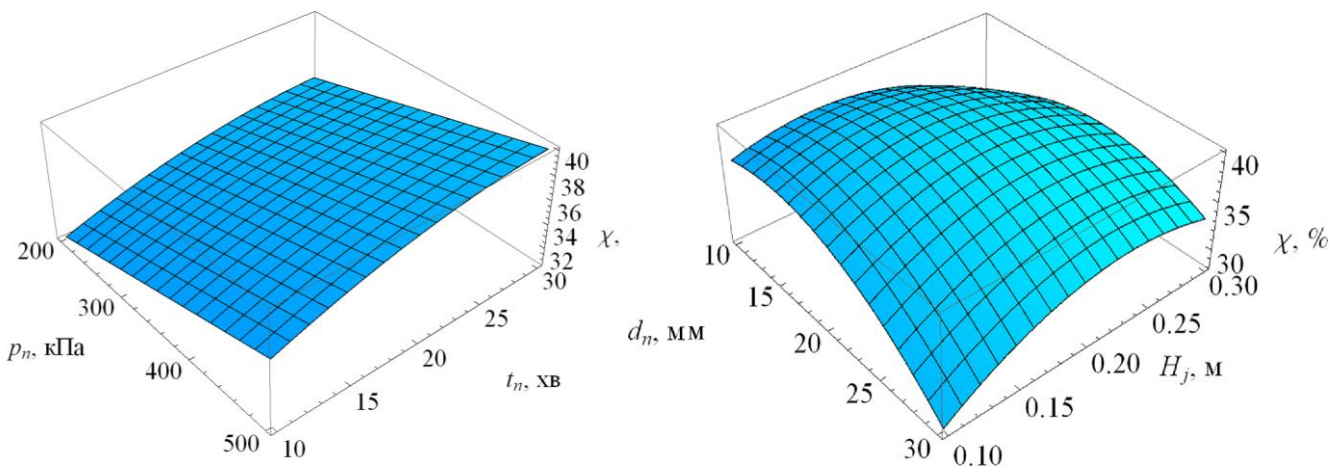
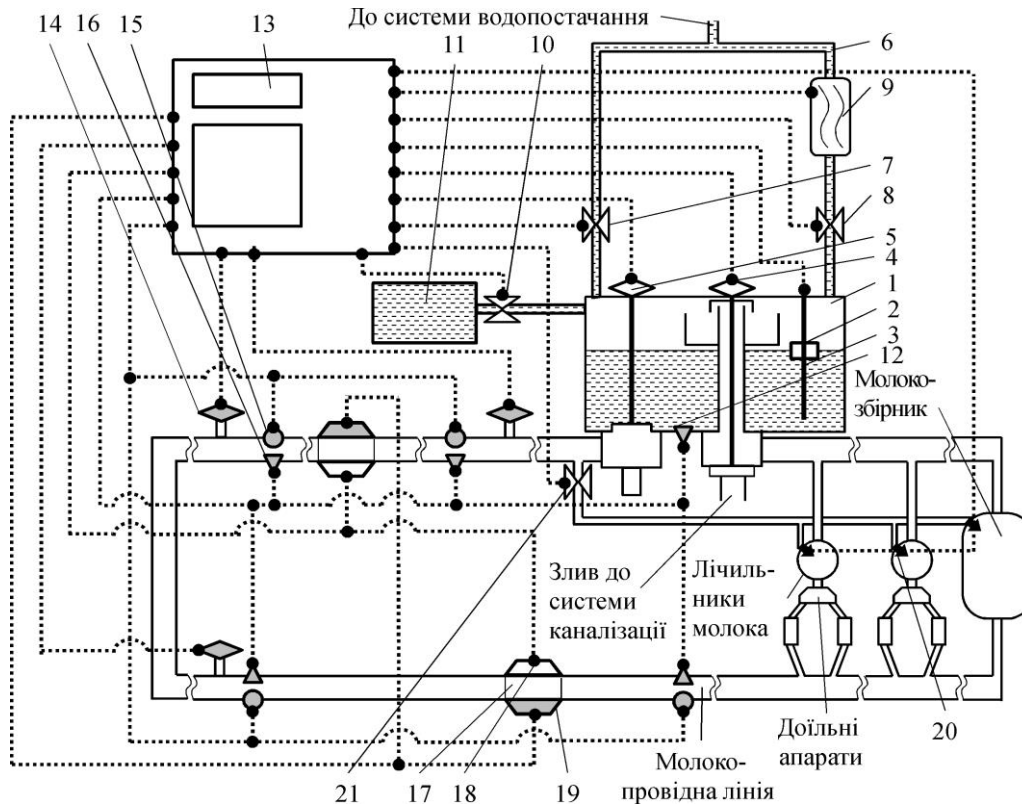


Рисунок 14 – Залежність ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$  від тиску на виході насадки  $p_n$ , її внутрішнього діаметра  $d_n$  і відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$

У п'ятому розділі «Реалізація результатів досліджень» наведено обґрунтування конструктивно-технологічної схеми автоматичної системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок; методику та результати виробничої перевірки, техніко-економічне обґрунтування та впровадження результатів досліджень.

На основі поведених теоретичних та експериментальних досліджень процесу промивання із повітряним та гідроінжекторами, отриманих раціональних режимних параметрів їх роботи, розроблено автоматичну систему промивання молокопровідної лінії, що реалізує функції оперативного визначення стану забрудненості молокопровідної лінії за його показниками та автоматично змінює режимні параметри роботи повітряних та гідроінжекторів. Принцип роботи системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок пояснюється конструктивно-технологічною схемою, яка наведена на рис. 15.

Виробничу перевірку роботи автоматизованої системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок було проведено в умовах фермерських господарств на доїльних установках з верхнім молокопроводом УДМ-100 «Брацлавчанка» та з нижнім молокопроводом УДЕ-16 Ялинка.



- 1 – бак; 2 – поплавок; 3 – датчик рівня мийного розчину; 4 – клапан циркуляції-зливу; 5 – молокопровід; 6 – трубопровід; 7 – електромагнітний клапан пуску холодної води; 8 – електромагнітний клапан пуску гарячої води; 9 – водонагрівач; 10 – електромагнітний клапан пуску концентрату мийного розчину; 11 – ємність; 12 – контрольний датчик температури; 13 – блок керування; 14 – електромагнітні клапани пуску повітря; 15 – датчики вакуумметричного тиску; 16 – датчики температури; 17 – фотодатчики; 18 – фотодіоди; 19 – фоторезистори; 20 – гідроінжектори; 21 – електромагнітний клапан пуску мийного розчину
- Рисунок 15 – Конструктивно-технологічна схема автоматизованої системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок

У результаті виробничої перевірки встановлено, що найменше значення мікробіологічного забруднення молока спостерігається для варіанту із раціональними параметрами режиму роботи повітряних інжекторів при підключених гідроінжекторах. Для УДЕ-16 «Ялинка» складає 82 тис. КУО/см<sup>3</sup> (екстра ґатунок молока), а для УДМ-100 «Брацлавчанка» – 248 тис. КУО/см<sup>3</sup> (вищий ґатунок молока).

При цьому найменші значення витрати води спостерігається для варіанту із найменшою тривалістю промивання (5 хв/10 хв/5 хв) роботи повітряних інжекторів при відключених гідроінжекторах. Для УДЕ-16 «Ялинка» складає 185 л, а для УДМ-100 «Брацлавчанка» – 268 л.

Найменше значення енерговитрат спостерігається для базового варіанту системи промивання. Для УДЕ-16 «Ялинка» складає 13,5 кВт-год., а для УДМ-100 «Брацлавчанка» – 21,4 кВт-год. За результатами техніко-економічних розрахунків встановлено, що для доїльної установки УДМ-100 «Брацлавчанка» найбільший питомий економічний ефект (0,11 грн./кг) спостерігається для варіанту із адаптивним режимами роботи повітряних інжекторів при відключених гідроінжекторах. Для доїльної установки УДЕ-16 Ялинка найбільший питомий економічний ефект (0,36 грн./кг) спостерігається для варіанту із адаптивним режимом роботи повітряних інжекторів при підключених гідроінжекторах.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено проблему підвищення ефективності процесу промивання доїльних установок за рахунок використання інтегрованих в систему повітряних та гідравлічних інжекторів, раціональні режими роботи яких забезпечуються системою автоматизованого контролю.

1. Аналіз чинників зниження гатунку молока в наслідок бактеріального забруднення показав, що це є результатом неякісного виконання технологічної операції промивання доїльних установок та утворення молочних відкладень на внутрішніх поверхнях молокопровідної системи. В результаті аналізу існуючих конструкцій техніко-технологічного забезпечення промивання встановлено, що найбільш ефективними є циркуляційні системи промивання із регульованим утворенням пробкового режиму. Для підвищення ефективності і ресурсозбереження (зменшенням споживання витрат повітря, гарячої води, енергії і експлуатаційних витрат) процес промивання доїльних установок повинен бути адаптивним на основі даних, отриманих із засобів контролю оцінки стану поверхонь молокопровідної системи і гідродинамічних параметрів руху двофазного мийного розчину, що досягається використанням повітряних і гідроінжекторів на базі автоматизованого керування.

2. Аналітичні дослідження явища адгезії між молочними відкладеннями і поверхнею молокопровідної лінії дозволили встановити залежність найменшої допустимої швидкості руху мийного розчину, що забезпечує руйнування молочних відкладень від їх фізико-механічних властивостей (краєвих кутів  $\beta$ ,  $\gamma$  і поверхневого натягу між миючим розчином і відкладенням  $\sigma_{mf}$ ), при різних діаметрах молокопровідної лінії  $D_m$ . Так для діаметру молокопровідної лінії 50 мм найменша допустима швидкість руху мийного розчину складає 1,33 м/с, а для 70 мм – 1,06 м/с.

3. Розроблено математичну модель руху двофазного мийного розчину молокопровідною лінією, яка базується на рівняннях принципу суперпозиції сил і, як наслідок, тисків, неперервності течії, законів збереження мас, імпульсу і енергії з урахуванням явища гідравлічного удару, що виникає внаслідок дії періодично працюючого повітряного інжектора, інтегрованого в систему промивання. Розроблено математичну модель руху двофазного мийного розчину молокопровідною лінією з урахуванням явища гідравлічного удару, що виникає внаслідок дії періодично працюючого повітряного інжектора, інтегрованого в систему промивання. Вирішуючи задачу оптимізації режимних параметрів повітряного інжектора, що відповідають критеріям мінімізації значення товщини шару молока на стінці молокопроводу і мінімізації швидкості зміни тиску для різних значень діаметра молокопроводу, отримані наступні раціональні параметри: при  $D = 50$  мм:  $p_w = 45,0$  кПа,  $t_{inj} = 3,8$  с,  $t_p = 2,9$  с,  $h_m = 0,243$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 27,38$  кПа/с; при  $D = 60$  мм:  $p_w = 57,5$  кПа,  $t_{inj} = 3,6$  с,  $t_p = 2,5$  с,  $h_m = 0,306$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 35,32$  кПа/с; при  $D = 70$  мм:  $p_w = 74,5$  кПа,  $t_{inj} = 3,4$  с,  $t_p = 2,1$  с,  $h_m = 0,406$  мм,  $\Delta p/\Delta t = 43,42$  кПа/с.

4. Розроблено математичну модель роботи гідравлічного інжектора, інтегрованого в систему промивання. Отримані залежності радіуса ділянки удару струменя і його тиску на поверхню молокопровідної системи від внутрішнього діаметра насадки, відстані до неї, при різних значеннях тиску на виході насадки. Визначено раціональні значення конструктивних параметрів гідравлічного інжектора, що забезпечують руйнування молочних відкладень:  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 0,166$  м,  $R_a = 0,0236$  м.



5. На основі отриманих математичних моделей процесу роботи промивання доїльних установок із повітряним і гідроінжекторами, а також фотодатчика визначення забрудненості молокопровідної лінії (в межах від 0 до 1,93 мм) доїльної установки розроблено відповідну систему автоматизації, що дозволяє керувати режимними параметрами роботи інжекторів в залежності від рівня забрудненості молочними відкладеннями молокопровідного обладнання доїльних установок шляхом використання інтегрованого в молокопровід фотодатчика.

6. У результаті проведення лабораторних експериментальні досліджень запропонованої системи автоматизації контролю режимних параметрів роботи повітряних та гідравлічних інжекторів отримані параметри їх роботи (тиск на виході насадки  $p_n = 500$  кПа, відстань між насадкою і поверхнею  $H_j = 0,191$  м і її внутрішній діаметр  $d_n = 1,75$  мм), що забезпечують найбільше значення ступеня чистоти молокопровідного обладнання ( $\chi = 40,1$  %). Наочне і статистичне (за критерієм Фішера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  і коефіцієнтом кореляції  $R = 0,97$ ) порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень встановлено розбіжність 5-6 %, що підтверджує адекватність розроблених математичних моделей та достовірність отриманих в ході проведення чисельних розрахунків даних.

7. У результаті виробничої перевірки найменше значення мікробіологічного забруднення молока для УДЕ-16 Ялинка – 82 тис. КУО/см<sup>3</sup> (екстра гатунок молока), для УДМ-100 «Брацлавчанка» – 248 тис. КУО/см<sup>3</sup> (вищий гатунок молока) отримано при використанні варіанту компонування автоматизованої системи промивання з інтегрованими повітряними інжекторами, працюючими та підключеними гідроінжекторами. Найбільший питомий економічний ефект для УДМ-100 «Брацлавчанка» (0,11 грн./кг) отримано з варіантом компонування повітряними інжекторами, працюючими при адаптивних режимах та відключених гідроінжекторах, а для УДЕ-16 Ялинка (0,36 грн./кг) – з варіантом із адаптивною тривалістю промивання, адаптивному режимі роботи повітряних інжекторів та підключених гідроінжекторах.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Бабин І. А. Дослідження метрологічних характеристик пристрою для вимірювання вакуумметричних параметрів лінії промивання доїльної установки. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця, 2018. 3 (102). С. 5-10.

2. Бабин І. А. Фізико-математичний апарат руху двофазного мийного розчину по молокопровідній лінії. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця, 2019. 1 (104). С. 5-12.

3. Пришляк В. М., Бабин І. А. Результати досліджень фотодатчика визначення забрудненості молокопровідної лінії. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, вип. 49. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 206-212. (Особистий внесок здобувача: розроблено фотодатчик визначення забрудненості молокопровідної лінії)

4. Бабин І. А. Обґрунтування режимів роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця, 2019. 4 (107). С. 89-99.

5. Пришляк В. М., Бабин І. А., Гунько І. В. Моделювання режимів роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2020. № 1(105). С. 102-110. (Особистий внесок здобувача: проведено чисельне моделювання і узагальнення результатів)

6. Гунько І. В., Бабин І. А., Пришляк В. М. Експериментальні дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки. *Наукові горизонти. Scientific Horizons*. Житомир, 2020. № 03 (88). С. 44-53. (Особистий внесок здобувача: проведені експериментальні дослідження і узагальнені результати)

*Статті у наукових виданнях, включених до міжнародних науко метричних баз*

7. Pryshliak Viktor, Babyn Igor. Justification of the modes of the milk washing system of the milking installation. *ТЕКА. Quarterly journal of agri-food industry*, 2019. Vol. 19. No. 4. P. 5-12. (Особистий внесок здобувача: проведені дослідження і узагальнені результати)

#### *Патенти України*

8. Бабин І. А., Яропуд В. М., Грицун А. В., Пришляк В. М. (2020). Патент України на корисну модель 140923, МПК А01J 7/02 (2006.01). Автоматична система промивання молокопровідної лінії доїльних установок. Заявник: Вінницький національний аграрний університет, № u201909823. Заявл. 16.09.2019. Опубл. 10.03.2020, бюл. № 5. (Автором запропоновано використовувати фотодатчики і автоматичну систему адаптації системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок)

#### *Матеріали конференцій і тези*

9. Бабин Ігор. Методика моделювання процесу переміщення двофазного мийного розчину по молокопровідній лінії. Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. 30 травня 2019 р. Тернопіль: Крок, 2019. С. 90-91.

10. Бабин І. Теоретичні дослідження процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки. Тези наукових доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченої 85-річчю від дня народження академіка Л. В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К. Г. Шиндлера, 13 вересня 2019 року, УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого; Дослідницьке, 2019. С. 13-14.

11. Бабин І. А. Моделювання режимів роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XX Міжнародної наукової конференції, присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 17-19 жовтня, 2019 р. Миколаїв: МНАУ, 2019. С. 87-89.

12. Бабин І. А. Дослідження явища адгезії між відкладеннями і поверхнею молокопровідної лінії. VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». смт. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ». 2-27 грудня 2019 р. Глеваха-Київ, 2019. С. 7-9.

## АНОТАЦІЯ

**Бабин І. А. Підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машина і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Вінницький національний аграрний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2020.

Метою досліджень є підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок шляхом застосування відповідного автоматизованого техніко-технологічного забезпечення із обґрунтованими конструктивно-режимними параметрами.

Встановлено аналітичну залежність руху двофазного мийного розчину молокопровідною лінією доїльної установки з урахуванням гідравлічного удару, які обґрунтовують амплітудно-частотні характеристики системи промивання в залежності від конструкційних параметрів системи й фізико-механічних характеристик двофазного мийного розчину.

Розроблено математичні залежності, що уможливають оптимізацію режимних параметрів повітряного інжектора в залежності від конструктивних параметрів молокопроводів за мінімізації швидкості зміни тиску на довжині молокопровідної лінії й забезпечує руйнування молочних відкладень.

Отримано залежності якісних показників процесу промивання, які встановлюють вплив режимних характеристик повітряного інжектора системи промивання та конструкційних параметрів молокопровідної системи доїльної установки.

Отримали подальший розвиток залежність швидкості руху мийного розчину з врахування силових характеристик адгезії та фізико-механічних показників молочних відкладень, яка враховує конструкційні параметри молокопроводу та фізико-механічні характеристики мийного розчину, за якої уможливується подолання сил адгезії молочних відкладень.

Удосконалено методику дослідження забрудненості молокопровідної лінії на основі інтенсивності проходження світла заданого спектру через досліджуваний шар та встановлено кореляційний зв'язок між товщиною шару забруднення та інтенсивністю світлового потоку й коефіцієнтом поглинання світла шаром забруднення.

**Ключові слова:** доїльна установка, система промивання, гідродинамічні характеристики, режими роботи, якість молока, гідрудар, інжектор, автоматизація, алгоритм.

## АННОТАЦИЯ

**Бабин И. А. Повышение эффективности работы системы промывки доильных установок. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Винницкий национальный аграрный университет, Министерство образования и науки Украины, Винница, 2020.

Получена аналитическая зависимость движения двухфазного моющего раствора молокопроводной линии доильной установки с учетом гидравлического удара, обосновывающие амплитудно-частотные характеристики системы промывки в зависимости от конструктивных параметров системы и физико-механических характеристик двухфазного моющего раствора.



Получены зависимости качественных показателей процесса промывки, которые устанавливают влияние режимных характеристик воздушного инжектора системы промывки и конструкционных параметров молокопроводной системы доильной установки.

Усовершенствована методика исследования загрязненности молокопроводной линии на основе интенсивности прохождения света заданного спектра через исследуемый слой и установлена корреляционная связь между толщиной слоя загрязнения и интенсивностью светового потока и коэффициентом поглощения света слоем загрязнения.

**Ключевые слова:** доильная установка, система промывки, гидродинамические характеристики, режимы работы, качество молока, гидроудар, инжектор, автоматизация, алгоритм.

## ABSTRACT

**Babyn I. A. The improvement of efficiency of the washing system of milking machines. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Thesis for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.05.11 – Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production. – Vinnytsia National Agrarian University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2020.

The purpose of the research is to improve the efficiency of the washing system of milking machines by applying appropriate automated technical and technological support with the substantiated design and mode parameters.

To achieve this goal, a scientific hypothesis has been put forward, according to which the efficiency of the washing system of milking machines depends on the hydrodynamic processes of movement of two-phase washing solution and can be ensured by the automated control of the regime parameters of technical and technological support.

Analytical dependences of the movement of a two-phase detergent on the milk-conducting line of the milking machine taking into consideration hydraulic shock, which substantiate the amplitude-frequency characteristics of the washing system depending on the design parameters of the system and physical-mechanical characteristics of the two-phase detergent, have been determined.

Mathematical dependences have been developed that make it possible to optimize the regime parameters of the air injector depending on the design parameters of the milk system under the conditions of minimizing the rate of pressure change on the milk line and ensuring the destruction of milk sediments.

The dependence of the velocity of the detergent taking into account the force characteristics of adhesion and physical-mechanical parameters of milk sediments, which covers the structural parameters of the milk-conducting line and physical-mechanical characteristics of the detergent, which enables overcoming the adhesion forces of milk sediments.

The dependence of the influence of the design and mode parameters of the hydroinjector of the washing system of the milking machine, which creates a jet of detergent of directed action on the purification degree of the surface of the milk-conducting system from milk sediments, have been further developed.

The method of studying the contamination of the milk-conducting line on the basis of the light intensity of a given spectrum through the studied layer has been improved and the correlation between the thickness of the contamination layer and the intensity of light flux and the light absorption coefficient of the contamination layer has been defined.

The physico-mathematical model of operation processes of the hydro-injector of the washing system, that creates a jet of detergent of directional action for cleaning the inner surfaces of the milk-conducting system, has been developed. As the result of theoretical studies, the dependence of the radius of the area of impact of the jet and its pressure on the surface of the milk-conducting system from the inner diameter of the nozzle, the distance to it at different values of the pressure at the outlet of the nozzle has been obtained.

The expediency of using the developed equipment for automatic determination of the contamination of the milk-conducting line in the technological operation of washing milk systems has been experimentally proved. The dependence of the thickness of the layer of milk moving in the glass tube on the resistance of the photoresistor, which receives the light, is partially absorbed by the layer of milk.

Experimental studies of the air injector operating modes of the system have revealed the dependence of the rate of pressure change and changes in the degree of purity of the milk-conducting line from the working vacuum pressure, the volume flow rate of air through the air injector, the duration of the injection of the air injector and the duration of the pause.

The dependence of the value of the force of the jet of washing solution on the surface and the degree of cleaning of the surface from milk deposits after washing from the pressure at the outlet of the nozzle, the distance between the nozzle and the surface and its inner diameter.

As the result of experimental studies of the hydrojet injector of the washing system, the dependences of the force of the jet action of detergent solution on the surface and the degree of purification of the surface from the milk deposits after washing from the pressure at the outlet of the nozzle, the distance between the nozzle and the surface and its inner diameter have been determined.

On the basis of the theoretical and experimental research results, the design and technical documentation for the automatic system of washing the milk-conducting line of milking machines of different types have been developed and implemented at the enterprises for production, installation and repair of milking machines: ALC «Bratslav» (Bratslav, Vinnytsia region), PE «Agromech Plus» (Dnipro), using them we have managed to perform the appropriate technological process with higher productivity and quality, reducing energy consumption and water consumption.

The results of scientific researches have been verified and used by farms PE «AF Batkivshchyna» and PE «Radivske» SAP. The research results on numerical simulation of the movement of two-phase detergent on the milk-conducting line of the milking machine and the operation process of the automated washing system are used in teaching separate parts of disciplines «Machinery and equipment for animal husbandry», «Machinery and equipment and their use in animal husbandry», «Maintenance of machinery and equipment» at the Department of Agricultural Production Machinery and Equipment, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University.

**Key words:** milking machine, washing system, hydrodynamic characteristics, operation modes, milk quality, hydraulic impact, injector, automation, algorithm.

Підписано до друку 01.07.2020 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.  
Друк – лазер. Ум. друк. арк. 1,4.  
Наклад 100 прим. Зам. № 417

---

Надруковано у редакційно-видавничому відділі  
Вінницького національного аграрного університету  
м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008.

