



УДК 637.115:621.647.7

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-5

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

**Бабин Ігор Анатолійович**, к.т.н., доцент  
Вінницький національний аграрний університет

**Ihor Babyn**, Ph.D., Associate Professor  
Vinnytsia National Agrarian University

Метою досліджень є розробка математичної моделі роботи гідравлічного інжектора системи промивання і визначити конструктивні параметри інжектора, що забезпечують руйнування молочних відкладень на поверхні елементів доїльної установки складної геометричної конфігурації. Розроблено фізико-математичну модель процесу роботи гідроінжектора системи промивання, що створює струмінь миючого розчину направленої дії для очищення внутрішніх поверхонь молокопровідної системи. У результаті теоретичних досліджень отримані залежності радіуса ділянки 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  $p_n$ . Використовуючи елементну базу молочно-доїльного обладнання за базовий генератор гідравлічного тиску обрано молочний насос відцентрового типу низького тиску ( $\approx 3$  атм). При цьому  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 16,6$  см,  $R_a = 23,6$  мм.

У результаті експериментальних досліджень роботи гідроінжектора системи промивання встановлені залежності значення сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  і ступеня очищення поверхні від молочних відкладень після промивання  $\chi$  від тиску на виході насадки  $p_n$ , відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$  і її внутрішнього діаметра  $d_n$ . Наочне і статистичне (за критерієм Фішера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  і коефіцієнтом кореляції  $R = 0,97$ ) порівняння теоретичних і експериментальних результатів досліджень дозволяє стверджувати про адекватність і логічність отриманих залежностей сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  від факторів досліджень у відповідному діапазоні їх значень. У якості раціональних конструктивно-режимних параметрів гідроінжектора з умови максимуму ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання  $\chi = 40,1$  % визначено  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00175$  м,  $H_j = 0,191$  м.

**Ключові слова:** доїльні установки, система промивання, параметри, дослідження, модель.

**Ф. 17. Рис. 5. Табл. 1. Літ. 20.**

### 1. Вступ

Молоко від вимені корови проходить через доїльні апарати, молокопровід, молокозбірники, індивідуальні та групові лічильники тощо. Це обумовлює зниження якісних показників молока-сировини за бактеріологічною оцінкою [1]. Рекомендованими умовами покращення якості молока є процес промивання доїльних установок шляхом збільшення його тривалості, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат (води, мийного розчину, електроенергії тощо) [2]. Таким чином, створення ефективного автоматизованого техніко-технологічного забезпечення системи промивання доїльних установок набуває першочергового значення при вирішенні завдання підвищення якості молока.

### 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженням проблеми промивання молокопроводів доїльних установок присвячено багато робіт, зокрема А.М. Жмирко [3], А.І. Пунько [4], Ю.А. Цой і Р.А. Мамедова [5], А. С. Корольов [6], В. Б. Матвеев [7], А.П. Палій і Е.Б. Алієв [1, 2, 8].

У своїй роботі А. М. Жмирко [3] розглядає процес видалення частинок молочного жиру під дією сил дотичного тертя, що долають адгезійне зчеплення молочного жиру з поверхнею молокопровідної лінії. В свою чергу А.П. Палій [10] більш повно провів дослідження структури плівки молочних забруднень.

Кірсанов В. В. [11] у своїй роботі для створення пробкового режиму течії рідини при промиванні пропонує спосіб промивання з попередньою акумуляцією мийної рідини в ємності,



розташованій між промивним трубопроводом і молокопроводом. Недоліком поданої конструкції є перевитрати мийного розчину і нездатність контролювати гідродинамічний режим руху повітряної пробки, що може спричинити достатньо сильний гідравлічний удар, який може зруйнувати елементи молокопровідної лінії.

Для інтенсифікації процесу промивання молокопроводу від забруднень у своїй роботі Жмирко А.М. [3], пропонує під час циркуляційного промивання та дезінфекції періодично додатково подавати повітря за допомогою пульсопідсилювача на базі колектора доїльного апарату «Волга» і пружні пробки для механічного очищення внутрішньої поверхні молокопроводу. Зазначений спосіб створення пробкового потоку в молокопровідній системі заслуговує на увагу, але його використання під час промивання молокопроводів різної конфігурації не завжди доцільне. Як показала практика, еластичні піжі використовуються тільки для видалення залишків молока або миючої рідини, і не можуть використовуватися для механічного видалення забруднень у молокопроводі. Окрім цього в зазначеній конструкції системи промивання не можливо автоматично регулювати режимні параметри повітряних пробок, що може призвести до неякісного очищення поверхонь молокопровідних ліній або до значного підвищення тиску і утворення гідравлічного удару достатнього зусилля для руйнування стінок молокопроводу. Також в системі встановлено лише один інжектор повітряних пробок, що унеможливує процес очищення внутрішніх поверхонь на великій відстані від нього.

Палій А.П. і Алієв Е.Б. запропонували пристрій для промивання молокопровідних систем доїльних установок [1, 2, 8, 12, 13], який складається зі штанги з пружиною, яка повертається на осі. На кінцях штанги розташовані напірний клапан промивання мийною рідиною та повітряний клапан, які з'єднані з штангою за допомогою шарнірів. Штанга утримується у визначеному положенні пружинним елементом. Також Палій А. П. зазначає, що у виробничих умовах для визначення чистоти доїльно-молочного обладнання можна використовувати пристрій для визначення санітарно-гігієнічного стану доїльного обладнання [14, 15].

До недоліків зазначеного обладнання слід віднести відсутність за контролем параметрів турбулентного руху миючого засобу молокопровідною системою. А недоліком пристрою для визначення санітарно-гігієнічного стану є те, що він не містить конкретних кроків щодо визначення ефективності санітарної обробки молокопроводу загалом і не може бути використаний для оперативного визначення стану забрудненості під час проведення технологічної операції промивання.

На особливу увагу заслуговують автоматичні системи циркуляційного промивання доїльних установок. Відповідно до стандарту ISO 5707 всі доїльні установки повинні бути оснащені автоматом промивки [16].

Незважаючи на конструктивні відмінності, автоматичні системи промивання різних фірм мають такі основні блоки: програмний, блок виконавчих органів, дозувальний пристрій і резервуар для рідини. Можлива додаткова комплектація нагрівачем. Виходячи з можливості блочного виконання системи промивання, ряд фірм на основі базової моделі поставляє різні автоматичні системи промивання.

Основним завданням, яке ставиться при вдосконаленні систем промивання молокопровідних систем, – це ресурсозбереження, насамперед зменшення споживання витрати повітря, гарячої води, енергії і експлуатаційних витрат.

Різноманітність умов експлуатації і типів доїльного обладнання, з одного боку, а з іншого жорсткі вимоги до якості промивання, призвели до необхідності відмови від жорстких програм і до створення програмованих автоматів промивки. Останні дозволяють залежно від умов змінювати програму промивання, тривалість циклів, здійснювати моніторинг за виконанням процесу, своєчасно сигналізувати про збої.

Відомий автомат промивання АП-03 (БУАП-03), виробництва ВАТ «Брацлав» [17] складається з баку, поплавка, датчика рівня мийного розчину, клапана циркуляції-зливу, клапана всмоктування рідини у молокопровід, трубопроводу, електромагнітного клапана пуску холодної води, електромагнітного клапана пуску гарячої води, водонагрівача, електромагнітного клапана пуску концентрату мийного розчину, емності, контрольного датчика температури та блока керування. До недоліків зазначеного обладнання слід віднести неможливість контролювати стан забрудненості молокопровідної лінії, вакуумметричного тиску, температури і відповідно до цього змінювати режимні параметри його роботи, що призводить до недостатньої якості виконання технологічної операції промивання.

Для вирішення проблеми підвищення якості промивання і ресурсозбереження значну увагу приділено створенню керованого пробкового потоку. Це дозволяє, по-перше, забезпечити високу



якість промивання при великих довжинах і діаметрах молокопроводів і, по-друге, значно економити об'єм циркулюючої води і витрат хімічних реагентів [18].

Зазначений ресурсозберігаючий режим використаний фірмою DeLaval в автоматах промивання С100Е, фірмою GEA Farm Technologies в автоматі промивання SineTherm та ін. Також інжектування повітрям для ефективного циркуляційного промивання доїльної установки застосовується в автоматах MiniWash фірми PANAZOO і TOP WASH фірми InterPuls. Зокрема, фірма SAC пропонує системи промивання зі спонтанним утворенням рідинних пробок, і не рекомендує використовувати пристрій повітряної пульсації Uni-Air-Pulse, вважаючи, що це не впливає на підвищення ефективності промивання доїльного обладнання. Однак в режимі пробкового промивання збільшуються додаткові витрати повітря, що призводять до збільшення навантаження на вакуумні насоси і як наслідок збільшення енерговитрат [18]. Тому подальші дослідження будуть направлені на визначення гідродинамічних параметрів системи утворенням рідинних пробок.

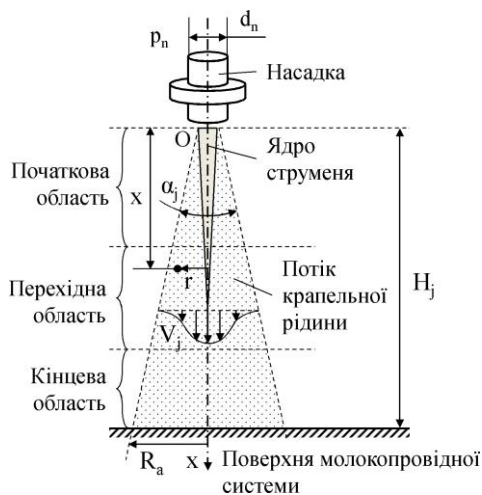
### 3. Мета та завдання дослідження

Метою досліджень є розробка математичної моделі роботи гідравлічного інжектора системи промивання і визначити конструктивні параметри інжектора, що забезпечують руйнування молочних відкладень на поверхні елементів доїльної установки складної геометричної конфігурації.

### 4. Матеріали і методи

Етапом теоретичних досліджень є обґрунтування режимів роботи гідроінжектора системи промивання доїльної установки. Гідроінжектор представляє собою насадку із отвором круглої форми, через які під тиском подається миючий розчин, створюючи при цьому струмені. Тому теоретичні дослідження побудовані на основі розрахунку параметрів струменів миючого розчину та їх дії на поверхні молокопроводної системи із молочними відкладеннями.

На рис. 1 представлена схема зміни структури струменя миючого розчину з віддаленням від сопла. Швидкісний потік крапель рідини, які корисні для процесу промивання, знаходяться в перехідній частині структури струменя.



**Рис. 1. Схема зміни структури струменя миючого розчину з віддаленням від сопла**

На початковій ділянці струменя миючого розчину відбувається падіння швидкості по осі струменя  $Ox$  і по перетину вздовж радіуса  $r$ . За дослідженнями [19] довжина початкової ділянки  $X_1$  визначається виразом

$$X_1 = \frac{0,67 d_n}{a^2}, \quad (1)$$

де  $d_n$  – внутрішній діаметр насадки, м;  $a$  – коефіцієнт структури струменя (для осісметричних струменів  $a \approx 0,007$ ).

Зміна швидкості по осі струменя  $V_{j0}$  на перехідній ділянці для осісметричного струменя визначається залежністю [19]:

$$V_{j0} = \frac{0,96}{\frac{2ax}{d_n} + 0,29} V_n, \quad (2)$$

де  $V_n$  – швидкість потоку рідини у насадці, м/с;  $x$  – відстань від початкової перетину струменя, м.

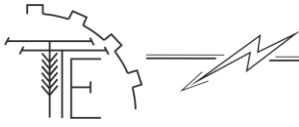
Поперечний профіль швидкості на перехідній ділянці струменя має форму, близьку до кривої Гауса.

Швидкість у довільній точці течії на перехідній ділянці струменя визначається залежністю [19]

$$V_j = V_{j0} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{r}{ax} \right)^2 \right], \quad (3)$$

де  $r$  – відстань по нормалі від осі до розглянутої точки, м.

Радіус струменя  $R_j$  на основній ділянці визначається залежністю [18]



$$R_t = \left(3,4 \frac{2ax}{d_n} + 1\right) \frac{d_n}{2}. \quad (4)$$

Середню по перерізу швидкість  $\bar{V}_j$  в довільному перерізі струменя можна отримати на підставі залежностей (1)–(4), взявши інтеграл на площі перерізу і розклавши експоненту в ряд Маклорена до першого наближення:

$$\bar{V}_j(x) = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} V_j dA_j = \frac{2\pi \cdot 0,96 V_n}{\pi R_t^2 \left(\frac{2ax}{d_n} + 0,29\right)} \int_0^{R_t} r \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{ax}\right)^2\right] dr = \frac{1,92 V_n a^2 x^2 d_n}{(3,4ax + 0,5d_n)(2ax + 0,29d_n)}. \quad (5)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

Щоб уникнути ускладнень розрахунку ефектів зсувного тиску, які можуть бути викликані рухом струменя вздовж поверхні, припускаємо, що струмінь не рухається, тобто процес є стаціонарним. Отже, враховуючи прийняте спрощення, стаціонарний струмінь надає тільки нормальний тиск на ділянку контакту.

Враховуючи структуру струменя на рис. 1, передбачається, що імпульс струменя муючого розчину залишається постійним між насадкою і точкою удару із поверхню молокопровідної системи. Зміну імпульсу струменя муючого розчину  $M$  можна представити у вигляді

$$M = \int_{A_j} V_j (\rho_1 V_j dA), \quad (6)$$

де  $\rho_1$  – густина муючого розчину, кг/м<sup>3</sup>.

Закон збереження імпульсу струменя муючого розчину для виходу його з насадки і для ділянки контакту має вигляд:

$$\rho_1 V_n^2 \left(\frac{\pi d_n^2}{4}\right) = \rho_1 (\bar{V}_j(H_j))^2 (\pi R_a^2), \quad \text{або } V_n d_n = 2 R_a \bar{V}_j(H_j), \quad (7)$$

де  $R_a$  – радіус області удару струменя, м;  $H_j$  – відстань між насадкою і поверхню молокопровідної системи, м.

Підставляючи в (7) вираз для  $\bar{V}_j(H_j)$  з (5) отримуємо вираз для радіусу області удару струменя  $R_a$

$$R_a = \frac{(3,4ax + 0,5d_n)(2ax + 0,29d_n)}{3,84a^2 x^2}. \quad (8)$$

З рівняння (5) і закону Бернуллі ( $p_a = \frac{\rho_1}{2} (\bar{V}_j(H_j))^2$ ) отримуємо

$$p_a = \frac{\rho_1}{2} V_n^2 \left( \frac{1,92a^2 x^2 d_n}{(3,4ax + 0,5d_n)(2ax + 0,29d_n)} \right)^2, \quad (9)$$

де  $p_a$  – тиск струменя на поверхню молокопровідної системи, Па.

У свою чергу швидкість потоку рідини у насадці визначається так само з закону Бернуллі

$$V_n = \sqrt{\frac{2p_n}{\rho_1}}, \quad (10)$$

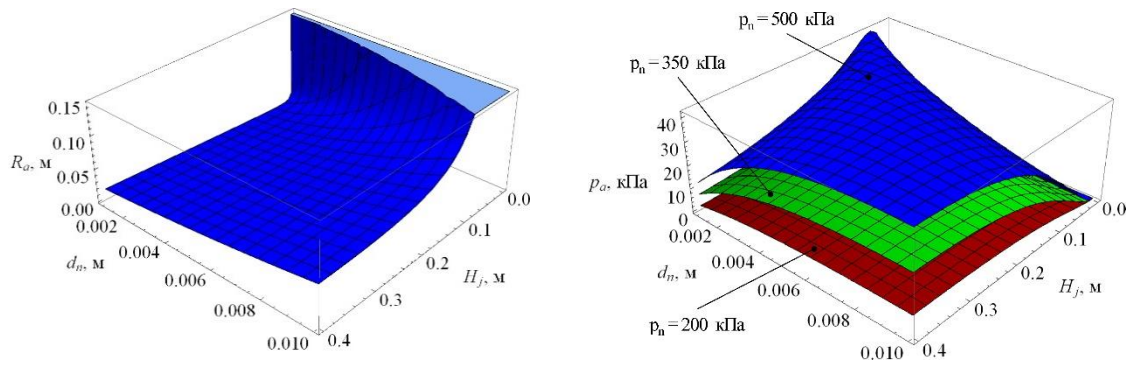
де  $p_n$  – тиск на виході насадки, Па.

Підставляючи (10) в (9) остаточно маємо

$$p_a = p_n \left( \frac{1,92a^2 x^2 d_n}{(3,4ax + 0,5d_n)(2ax + 0,29d_n)} \right)^2. \quad (11)$$

Графічна інтерпретація залежностей (8) і (9) представлені на рис. 2.





**Рис. 2.** Залежність радіусу області удару струменя  $R_a$  і тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  від внутрішнього діаметра насадки  $d_n$  і відстані до неї  $H_j$  при різних значеннях тиску на виході насадки  $p_n$

Для ефективної роботи гідроінжектора у вигляді насадки із отвором круглої форми необхідно, щоб тиск на виході насадки  $p_n$  був максимальним. Використовуючи елементну базу молочно-доїльного обладнання за базовий генератор гідравлічного тиску обрано молочний насос відцентрового типу низького тиску, який максимум може видавати 300 кПа ( $\approx 3$  атм).

Для визначення раціональних значень внутрішнього діаметра насадки  $d_n$  і відстані до неї  $H_j$  вирішимо в програмному пакеті Mathematica задачу максимізації тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a(d_n = 2,1 \text{ мм}, H_j = 16,6 \text{ см}) = 42,0 \text{ кПа}$ .

При цьому значення радіуса ділянки удару струменя  $R_a$  становить 23,6 мм. Розрахункова сила дії струменя миючого розчину за формулою  $F_a = p_a \pi R_a^2 = 74 \text{ Н}$  перевищує значення сили адгезії краплі молочного відкладення на поверхні молокопровідної системи  $F_c = 42 \text{ Н}$ .

Для перевірки фізико-математичної моделі роботи гідроінжектора системи промивання, робочим органом якого є насадка із круглим отвором, створено відповідне лабораторне обладнання. Схема експериментального стенду та його загальний вигляд наведено на рис. 3. Стенд складається з таких частин: робочий орган гідроінжектора системи промивання (насадка); тензодатчик на 10 кг, на якому закріплюється чашка Петрі; ваговий сенсор НХ711; пристрій Arduino Uno ATmega328P-PU, який приєднано до персонального комп'ютера із відповідним програмним забезпеченням. Тензодатчик з одного краю жорстко закріплений на нерухомому штативі. Чашка Петрі кріпиться на легкосмінних кронштейнах.

Факторами експериментальних досліджень є тиск на виході насадки  $p_n$ , внутрішній діаметр насадки  $d_n$ , відстань між насадкою і поверхнею  $H_j$ , тривалість дії струменя на поверхню насадки  $t_n$ . Межі та інтервали факторів досліджень представлені в табл. 1.

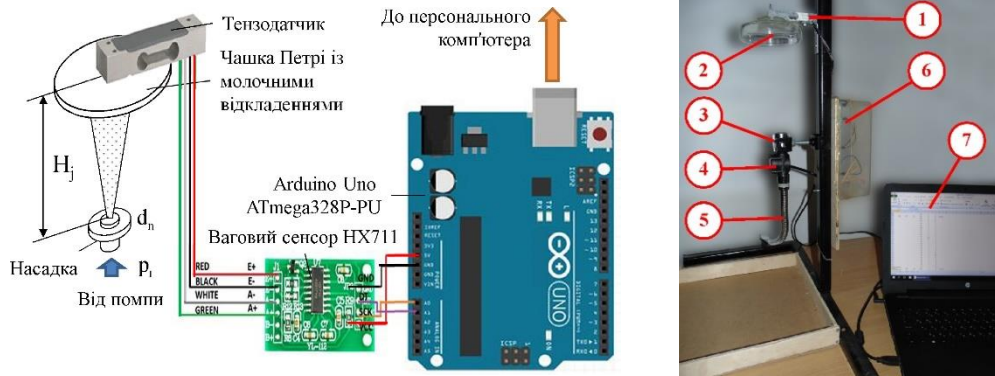
Тиск на виході насадки  $p_n$  встановлюється за допомогою зміни напруги на помпі PLD1206 (800 кПа, 12 В) і контролюється гідравлічним манометр. Внутрішній діаметр насадки  $d_n$  встановлюється шляхом заміни жиклерів із відповідним відкаліброваним діаметром отвору. Відстань між насадкою і поверхнею  $H_j$  контролюється лінійкою. Тривалість дії струменя на поверхню насадки  $t_n$  визначається секундоміром.

В якості критеріїв досліджень обрано силу дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  і ступінь очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$ .

Сила дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  визначалася з використанням тензодатчика, калібрувальну залежність якого можна представити у вигляді:

$$F_a = (10 \cdot 2^{-16} \cdot \text{bit} - m_{\text{Petri}})g, \quad (12)$$

де  $\text{bit}$  – значення тензодатчика отримане з ваговий сенсор НХ711 ( $\text{bit}(0 \text{ кг}) = 0$ ,  $\text{bit}(10 \text{ кг}) = 2^{16}$ );  $m_{\text{Petri}}$  – маса чашки Петрі, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .



**Рис. 3. Схема і загальний вигляд експериментального стенду для дослідження робочого органу гідроінжектора системи промивання (насадки із отвором круглої форми):**  
**1 – тензодатчик; 2 – чашка Петрі; 3 – насадка; 4 – датчик тиску; 5 – трубопровід;**  
**6 – Arduino Uno ATmega328P-PU; 7 – персональний комп'ютер**

**Таблиця 1.**

**Межі та інтервали факторів експериментальних досліджень**

Рівень	Тиск на виході насадки $p_n$ , кПа ( $x_1$ )	Внутрішній діаметр насадки $d_n$ , м ( $x_2$ )	Відстань між насадкою і поверхнею $H_j$ , м ( $x_3$ )	Тривалість дії струменя на поверхню $t_n$ , хв ( $x_4$ )
Верхній (+1)	500	0,003	0,3	30
Середній (0)	350	0,002	0,2	20
Нижній (-1)	200	0,001	0,1	10
Інтервал	150	0,001	0,1	10

Ступінь очищення поверхні (чашки Петрі) від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$  визначався за формулою:

$$\chi = 100 \cdot \frac{m''_{\text{Petri}} - m'_{\text{Petri}}}{m'_{\text{Petri}} - m_{\text{Petri}}}, \quad (13)$$

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 (ВВ<sub>3</sub>) 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 [20]. Однак визначення критеріїв відбувалося через кожні 10 хв (фактор – тривалість дії струменя на поверхню насадки  $t_n$ ). Повторність дворазова. Далі з використанням програмного пакету Mathematica визначалася модель регресії другого порядку для кожного із запропонованих критеріїв.

Експериментальні дослідження режимів роботи гідроінжектора системи промивання елементів доїльної установки виконувалися таким чином. Перед початком досліджень було підготовлено  $15 \times 2 = 30$  чашок Петрі із свіжим молоком із однаковими властивостями, які були розміщені у приміщенні при температурі 15-25 °С на 30 діб. У результаті в чашках Петрі утворилися молочні відкладення. Маса пустих чашок Петрі заздалегідь відома.

Далі чашку Петрі із молочним відкладенням зважували і закріплювали на тензодатчику. Після чого запускали помпу і, створюючи струмінь насадкою гідроінжектора із заздалегідь встановленими параметрами, визначали силу дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$ . Через кожні 10 хв висушували чашку Петрі у сушильній шафі і визначали її масу. Всі дані зводилися до єдиної таблиці. На основі отриманих значень мас, за формулою (13), визначали ступінь очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$ .

## 5. Викладення основного матеріалу

Внаслідок обробки даних у програмному пакеті Mathematica отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на силу дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  мала вигляд

$$F_a = 58,7698 + 7,53566 x_1 + 0,953334 x_1^2 + 1,30602 x_2 - 0,4575 x_1 x_2 - 2,79158 x_2^2 - 1,16708 x_3 + 0,09 x_1 x_3 + 4,53155 x_2 x_3 - 3,49488 x_3^2. \quad (14)$$



Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1558 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .

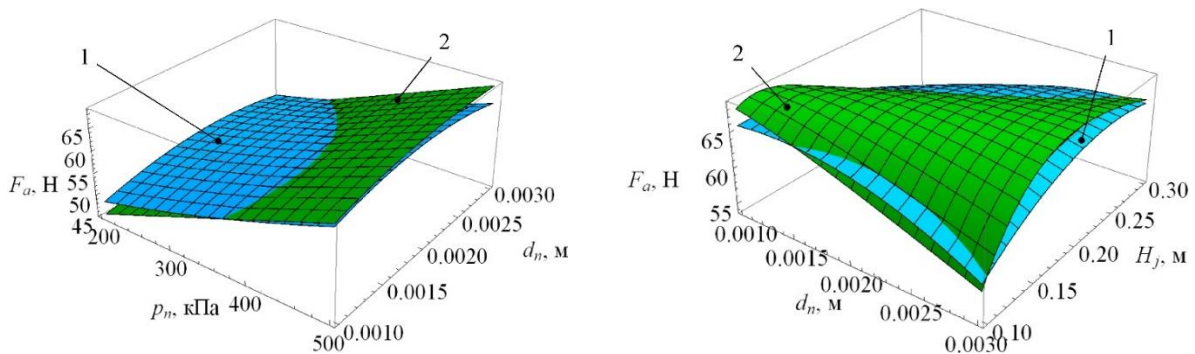
Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{ад}^2 = 0,6781$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,2803$ ; значення критерію Фішера  $F = 2,418 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За табличним значенням критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  були відкинуті незначущі на рівні довірчої ймовірності більше 95 % коефіцієнти регресії і отримано рівняння у розкдованому вигляді:

$$F_a = 36,9444 - 2,79158 \cdot 10^6 d_n^2 + 37,4935 H_j - 349,488 H_j^2 + 4476,73 d_n + 45315,5 H_j d_n - 3,05 p_n d_n + 0,0266784 p_n + 0,0000423704 p_n^2. \quad (15)$$

Максимальне значення силу дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a = 67,3$  Н досягається при  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00203$  м,  $H_j = 0,1855$  м. Фіксуючи по чергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовані на рис. 4, графічні інтерпретації експериментальної залежності (15) і теоретичної  $F_a = p_a \pi R_a^2$  відповідно до (8) і (11).

Наочне (згідно з рис. 4) і статистичне (за критерієм Фішера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  і коефіцієнтом кореляції  $R = 0,97$ ) порівняння теоретичних і експериментальних результатів досліджень дозволяє стверджувати про адекватність і логічність отриманих залежностей сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  від факторів досліджень у відповідному діапазоні їх значень.



**Рис. 4. Залежність значення сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  від тиску на виході насадки  $p_n$ , її внутрішнього діаметра  $d_n$  і відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$ : 1 – експериментальна залежність; 2 – теоретична залежність**

Також з рис. 4 видно, що із збільшенням тиску на виході насадки  $p_n$  сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  також збільшується, а для відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$  і її внутрішнього діаметра  $d_n$  спостерігається оптимум, фізичний зміст якого пояснюється протилежністю залежностей радіуса струменя  $R_i$  і тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  (8) (рис. 2).

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

$$\begin{aligned} \chi = & 36,5154 + 2,1899 x_1 + 0,906648 x_1^2 - 0,0691821 x_2 - 1,72748 x_1 x_2 - \\ & - 3,87887 x_2^2 - 0,28071 x_3 + 0,413364 x_1 x_3 + 2,52184 x_2 x_3 - \\ & - 3,52624 x_3^2 + 2,05251 x_4 + 0,195778 x_1 x_4 - 0,23794 x_2 x_4 + \\ & + 0,150394 x_3 x_4 - 0,898557 x_4^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,2712 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{ад}^2 = 2,750$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 2,434$ ; значення критерію Фішера  $F = 1,13 < F_{0,05}(35, 90) = 1,55$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За табличним значенням критерію Стьюдента  $t_{0,05}(90) = 1,99$  були відкинуті незначущі на рівні довірчої ймовірності більше 95 % коефіцієнти регресії і отримано рівняння у розкдованому вигляді:

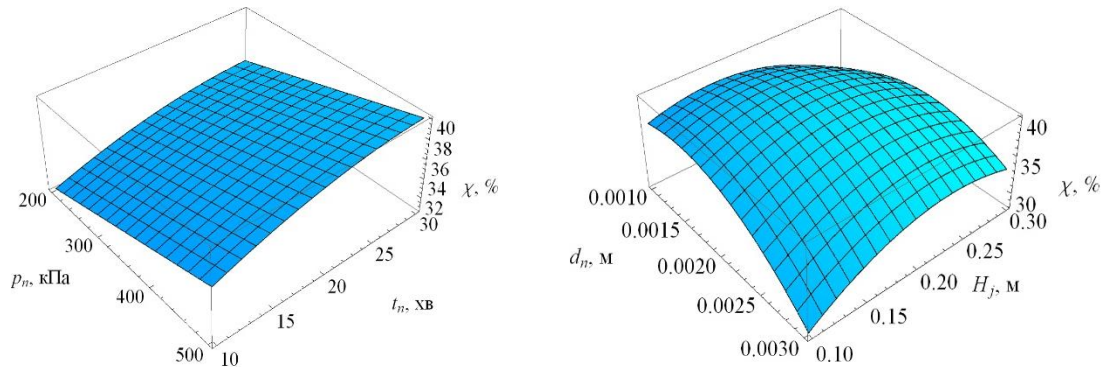
$$\begin{aligned} \chi = & - 3,88822 - 3,87887 \cdot 10^6 d_n^2 + 90,6127 H_j - 352,624 H_j^2 + \\ & + 14502,6 d_n + 25218,4 H_j d_n - 11,5165 p_n d_n + 0,0376324 p_n + \\ & + 0,564674 t_n - 0,00898557 t_n^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Максимальне значення ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi = 40,1$  % досягається при  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00175$  м,  $H_j = 0,191$  м.





Фіксуючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовані на рис. 5, графічні інтерпретації експериментальної залежності (17).



**Рис. 5. Залежність ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$  від відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$  і її внутрішнього діаметра  $d_n$ , тиску на виході насадки  $p_n$  та тривалості дії струменя на поверхню  $t_n$**

З рис. 5 видно, що із збільшенням тиску на виході насадки  $p_n$  та тривалості дії струменя на поверхню  $t_n$  ступень очищення поверхні від молочного відкладення після промивання гідроінжектором  $\chi$  також збільшується, однак наближається до певного асимптотичного значення, а для відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$  і її внутрішнього діаметра  $d_n$  спостерігається оптимум, фізичний зміст якого пояснюється протилежністю залежностей радіуса струменя  $R_s$  (8) (рис. 2) і тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  (11) (рис. 2).

У якості раціональних конструктивно-режимних параметрів гідроінжектора з умови максимуму ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання  $\chi = 40,1$  % визначено  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00175$  м,  $H_j = 0,191$  м.

## 6. Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Розроблено фізико-математичну модель процесу роботи гідроінжектора системи промивання, що створює струмінь миючого розчину направленої дії для очищення внутрішніх поверхонь молокопровідної системи. У результаті теоретичних досліджень отримані залежності радіуса ділянки 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  $p_n$ . Використовуючи елементну базу молочно-доїльного обладнання за базовий генератор гідравлічного тиску обрано молочний насос відцентрового типу низького тиску ( $\approx 3$  атм). При цьому  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 16,6$  см,  $R_a = 23,6$  мм.

2. У результаті експериментальних досліджень роботи гідроінжектора системи промивання встановлені залежності значення сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  і ступеня очищення поверхні від молочних відкладень після промивання  $\chi$  від тиску на виході насадки  $p_n$ , відстані між насадкою і поверхнею  $H_j$  і її внутрішнього діаметра  $d_n$ . Наочне і статистичне (за критерієм Фішера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  і коефіцієнтом кореляції  $R = 0,97$ ) порівняння теоретичних і експериментальних результатів досліджень дозволяє стверджувати про адекватність і логічність отриманих залежностей сили дії струменя миючого розчину на поверхню  $F_a$  від факторів досліджень у відповідному діапазоні їх значень.

3. У якості раціональних конструктивно-режимних параметрів гідроінжектора з умови максимуму ступеня очищення поверхні від молочного відкладення після промивання  $\chi = 40,1$  % визначено  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00175$  м,  $H_j = 0,191$  м.

## Список використаних джерел

1. Paliy A., Aliiev E., Paliy A., Ishchenko K., Shkromada O., Musiienko Y., Plyuta L., Chekan O., Dubin R., Mohutova V. Development of a device for cleansing cow udder teats and testing it under industrial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(1(109)). P. 43–53.
2. Paliy A., Aliiev E., Paliy A., Nechyporenko O., Baidevliatova Y., Baydevliatov Y., Lazorenko A., Ukhovskiy V., Korniienko L., Sharandak P. Determining the efficiency of cleaning a milk line made from different materials from contaminants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 (1 (112)). P. 76–85.
3. Жмырко А.М. Обоснование параметров и режимов работы системы мойки молокопровода доильных установок для доения коров в стойлах: Дис. ... канд. техн. наук. Зерноград. 2015. 159 с.
4. Пунько А.И. Обоснование параметров автомата промывки доильной установки АП-100. *Весы*





- Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусь. 2006. №5. С. 199–201.
5. Soj J. A., Mamedova R. A. The influence of parameters milk pipeline of milking installation on modes of motion an gas-liquid to mixtures. *Problemy intenyfikacii produkcji zwierzeczej z uwzględnieniem ochrony srodowiska i standardow UE*. 2005. P. 355–359.
  6. Дмитрів В. Т. Модель витрати повітря елементами доїльного апарата. *Вісник Львівського держ. аграр. ун-ту : агроінженерні дослідження*. 2006. № 10. С. 483–488.
  7. Луценко М., Зволейко Д. Дослідження процесу доїння корів у спеціалізованих доїльних залах. *Техніка і технології АПК*. 2012. № 9 (36). С. 31–34.
  8. Paliy A., Aliiev E., Nanka A., Bogomolov O., Bredixin V., Paliy A., Shkromada O., Musiienko Y., Stockiy A., Grebenik N. Identifying changes in the technical parameters of milking rubber under industrial conditions to elucidate their effect on the milking process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. Issue 1 (111). P. 21–29.
  9. Reinemann D. J. System Design and Performance Testing for Cleaning Milking Systems. Proc. Designing a Modern Milking Center, Northeast Regional Agricultural Engineering Services National Conference, November 19 - December 1, 1995, Rochester, New York.
  10. Палій А. П. Дослідження процесу очищення доїльних установок різного типу після доїння. *Науково-технічний бюллетень. НААН, Ін-т тваринництва*. 2014. № 112. С. 109–114.
  11. Dmytriv V. Dynamic characteristics of hydropneumatic milking systems. *Zbornik radova: proceedings, Opatija, Croatia*. 2007. February 13–16. P. 332–335.
  12. Патент на корисну модель UA 110859 U, МПК А01J 7/02 (2006.01) Пристрій для промивання молокопроводних систем доїльних установок / Палій А. П.; заявник Палій А. П. № u201603632; заявл. 05.04.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20, 2016 р.
  13. Палій А. П. Контроль очищення молокопроводної лінії на основі технологічних інновацій. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 10. С. 26–29.
  14. Патент на корисну модель UA 62161 U, МПК А01J 7/00. Пристрій для визначення санітарно-гігієнічного стану доїльного обладнання / Палій А. П., Палій А. П., Шепетко Ю. В. № u201102231; Заявл. 25.02.2011; Опубл. 10.08.2011 Бюл. № 15, 2011.
  15. Пат. на корисну модель № 113770 UA, МПК А01J7/00, А01J7/02. Стенд для дослідження чистоти промивання молокопроводу доїльних установок. А. П. Палій. № u 201608959; заявл. 22.08.2016; опубл. 10.02.2017; Бюл. № 3.
  16. Шевченко І. А., Алієв Е. Б. Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок; за ред. І. А. Шевченка. Запоріжжя : Акцент Інвест-трейд, 2013, 156 с.
  17. Блок управління автоматом промивки БУАП-03 (версії 3.0 и 3.1) WM-TURBO. Паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2017. Вінниця. ВАТ «Брацлав». 14 с.
  18. Gunko I., Babyn I., Aliiev E., Yaropud V., Hrytsun A. Research into operating modes of the air injector of the milking parlor flushing system. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*. 2021. Vol. 83. Iss. 2. P. 297–310.
  19. Sabin-Cristian Ceuca. Computational Simulations of Direct Contact Condensation as the Driving Force for Water Hammer. Genehmigten Dissertation. Technische Universität München Lehrstuhl Für Nukleartechnik. 2015. 176 p.
  20. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілька Д. О., Бакарджієв Р. О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навч. посіб.; За заг. ред. Д.О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя : СТАТУС, 2017, 1181 с.

### References

- [1] Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Ishchenko, K., Shkromada, O., Musiienko, Y., Plyuta, L., Chekan, O., Dubin, R. & Mohutova, V. (2021). Development of a device for cleansing cow udder teats and testing it under industrial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1 (109)), 43–53. [in English].
- [2] Paliy, A., Aliiev, E., Paliy, A., Nechyporenko, O., Baidevliatova, Y., Baydevliatov, Y., Lazorenko, A., Ukhovskiy, V., Korniienko, L. & Sharandak, P. (2021). Determining the efficiency of cleaning a milk line made from different materials from contaminants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 76–85. [in English].
- [3] Zhmyrko, A.M. (2005). Obosnovaniye parametrov i rezhimov raboty sistemy moyki molokoprovoda doil'nykh ustanovok dlya doyeniya korov v stoylakh [Substantiation of parameters and operating modes of the milk pipeline washing system of milking installations for milking cows in stalls]. Dis. ... Cand. technical sciences. Zernograd, 159. [in Russian].
- [4] Pun'ko, A.I. (2006). Obosnovaniye parametrov avtomata promyvki doil'noy ustanovki AP-100 [Substantiation of the parameters of the automatic washing machine for the milking installation AP-



- 100] Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus, 5, 199-201. [in Russian].
- [5] Coj, J.A. & Mamedova, R.A. (2005). The influence of parameters milk pipeline of milking installation on modes of motion an gas-liquid to mixtures. *Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE*. Warszawa, 355–359. [in English].
- [6] Dmytriv V.T. (2006). Model' vytraty povitrya elementamy doyl'noho aparata. *Visnyk L'vivs'koho derzh. ahrrar. un-tu : ahroinzhenerni doslidzhennya*, 10, 483–488. [in Ukrainian].
- [7] Lutsenko, M. & Zvoleyko, D. Doslidzhennya protsesu doyinnya koriv u spetsializovanykh doyl'nykh zalakh, *Tekhnika i tekhnolohiyi APK*, 2012, 9 (36), 31–34. [in Ukrainian].
- [8] Paliy, A., Aliiev, E., Nanka, A., Bogomolov, O., Bredixin, V., Paliy, A., Shkromada, O., Musiienko, Y., Stockiy, A. & Grebenik, N. (2021). Identifying changes in the technical parameters of milking rubber under industrial conditions to elucidate their effect on the milking process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 1 (111), 21–29. [in English].
- [9] Reinemann, D.J. (1995). System Design and Performance Testing for Cleaning Milking Systems. Proc. Designing a Modern Milking Center, Northeast Regional Agricultural Engineering Services National Conference, November 19 - December 1, 1995, Rochester, New York. [in English].
- [10] Paliy, A.P. (2014). Doslidzhennya protsesu ochyshchennya doyl'nykh ustanovok riznoho typu pislya doyinnya [Research of the process of cleaning milking machines of different types after milking]. *Scientific and technical bulletin. NAAS, Inst. Of Animal Husbandry*. 112, 109–114. [in Ukrainian].
- [11] Dmytriv, V. (2007). Dynamic characteristics of hydropneumatic milking systems. *Zbornik radova: proceedings, Opatija, Croatia*. February 13–16, 332-335. [in Ukrainian].
- [12] Patent for utility model UA 110859 U, IPC A01J 7/02 (2006.01) Device for washing milk supply systems of milking parlors / Paliy AP; applicant Paliy AP № u 2016 03632; declared 05.04.2016; publ. 10/25/2016, Bull. № 20, 2016. [in Ukrainian].
- [13] Paliy, A.P. (2016). Kontrol' ochyshchennya molokoprovodnoyi liniyi na osnovi tekhnolohichnykh innovatsiy [Control of milk line cleaning based on technological innovations]. *Bulletin of Agricultural Science*. 10, 26–29. [in Ukrainian].
- [14] Patent for utility model UA 62161 U, IPC A01J 7/00. Device for determining the sanitary and hygienic condition of milking equipment / Paliy AP, Paliy AP, Shepetko Yu.V. № u201102231; Application 25.02.2011; Publ. 10.08.2011 Bull. № 15, 2011. [in Ukrainian].
- [15] Utility model patent № 113770 UA, IPC A01J7 / 00, A01J7 / 02. The stand for research of cleanliness of washing of a milk line of milking installations. AP Paliy. № u 201608959; declared 22.08.2016; publ. 2017-02-10; Bull. № 3. [in Ukrainian].
- [16] Shevchenko, I.A. & Aliiev, E.B. (2013). Naukovo-metodychni rekomendatsiyi z bahatokryterial'noho vyrobnychoho kontrolyu doyl'nykh ustanovok [Scientific and methodical recommendations on multicriteria production control of milking parlors]. Edited by Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAAS of Ukraine, I.A. Shevchenko. *Zaporozhye: Accent Invest-trade*. 2013, 156. [in Ukrainian].
- [17] Automatic flushing control unit BUAP-03 (versions 3.0 and 3.1) WM-TURBO. Passport, technical description and operating instructions. (2017). Vinnytsia. WAT "Bratslav". 14 p. [in Russian].
- [18] Gunko, I., Babyn, I., Aliiev, E., Yaropud, V. & Hrytsun, A. (2021). Research into operating modes of the air injector of the milking parlor flushing system. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 83, 2, 297–310. [in English].
- [19] Sabin-Cristian Ceuca. Computational Simulations of Direct Contact Condensation as the Driving Force for Water Hammer. *Genehmigten Dissertation*. Technische Universität München Lehrstuhl Für Nukleartechnik. 2015, 176. [in English].
- [20] Kysel'ov, O.V., Komarova, I.B., Mil'ko, D.O. & Bakardzhyev, R.O. (2017). Statystychna obrobka i oformlennya rezul'tativ eksperymental'nykh doslidzen' (iz dosvidu napysannya dysertatsiynykh robit): Navchal'nyy posibnyk [Statistical processing and registration of results of experimental researches (from experience of writing of dissertations): the Textbook]. For the general ed. DO Milka. Institute of Livestock Mechanization NAAS. Electronic analogue of the printed edition (e-book). Zaporozhye: STATUS, 1181. [in Ukrainian].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Целью исследований является разработка математической модели работы гидравлического инжектора системы промывки и определения конструктивных параметров инжектора, обеспечивающие разрушение молочных отложений на поверхности элементов доильной установки сложной конфигурации. Разработана физико-математическая модель процесса работы гидроинжектора системы промывки, который создает струю моющего раствора направленного действия для очистки внутренних поверхностей молокопроводной системы. В результате



теоретических исследований получены зависимости радиуса участка удара струи  $R_a$  и его давления на поверхность молокопроводной системы  $p_a$  от внутреннего диаметра насадки  $d_n$ , расстояния до нее  $H_j$  при различных значениях давления на выходе насадки  $p_n$ . Используя элементную базу молочно-доильного оборудования в качестве базового генератора гидравлического давления выбран молочный насос центробежного типа низкого давления ( $\approx 3$  атм). При этом  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 16,6$  см,  $R_a = 23,6$  мм. В результате экспериментальных исследований работы гидроинжектора системы промывки установлены зависимости значения силы действия струи моющего раствора на поверхность  $F_a$  и степени очистки поверхности от молочных отложений после промывания  $\chi$  от давления на выходе насадки  $p_n$ , расстояния между насадкой и поверхностью  $H_j$  и ее внутреннего диаметра  $d_n$ . Наглядное и статистическое (по критерию Фишера  $F = 1,68 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$  и коэффициенту корреляции  $R = 0,97$ ) сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований позволяет утверждать об адекватности и логичности полученных зависимостей силы действия струи моющего раствора на поверхность  $F_a$  от факторов исследований в соответствующем диапазоне их значений. В качестве рациональных конструктивно-режимных параметров гидроинжектора из условия максимума степени очистки поверхности от молочного отложения после промывания  $\chi = 40,1\%$  определено  $p_n = 500$  кПа,  $d_n = 0,00175$  м,  $H_j = 0,191$  м.

**Ключевые слова:** доильные установки, система промывки, параметры, исследования, модель.  
**Ф. 17. Рис. 5. Табл. 1. Лит. 20.**

## RESULTS OF HYDRODYNAMIC SYSTEM RESEARCH MILKING OF MILKING INSTALLATIONS

The aim of the research is to develop a mathematical model of the hydraulic injector of the flushing system and to determine the design parameters of the injector that ensure the destruction of milk deposits on the surface of the elements of the milking parlor of complex geometric configuration. A physical and mathematical model of the process of operation of the hydraulic injector of the flushing system has been developed, which creates a jet of detergent solution of directed action for cleaning the inner surfaces of the milk system. As a result of theoretical researches dependences of radius of a site of blow of a stream  $R_a$  and its pressure on a surface of milk pipe system  $p_a$  on internal diameter of a nozzle  $d_n$ , distance to it  $H_j$  at various values of pressure on an exit of a nozzle  $p_n$  are received. Using the element base of the milking equipment, a low-pressure centrifugal type milk pump ( $\approx 3$  atm) was selected as the basic hydraulic pressure generator. The  $d_n = 2.1$  mm,  $H_j = 16.6$  cm,  $R_a = 23.6$  mm.

As a result of experimental studies of the hydroinjector of the flushing system, the dependences of the value of the force of the cleaning solution jet on the surface  $F_a$  and the degree of cleaning of the surface from milk deposits after flushing  $\chi$  from the nozzle outlet pressure  $p_n$ , the distance between the nozzle and the surface  $H_j$  and its inner diameter  $d_n$ . Visual and statistical (according to Fisher's criterion  $F = 1,68 < F_{0,05}(6,30) = 2,42$  and correlation coefficient  $R = 0,97$ ) comparison of theoretical and experimental results of researches allows to assert about adequacy and logic of the received dependences of force of action. jet of detergent solution on the surface of  $F_a$  from the research factors in the appropriate range of their values.  $p_n = 500$  kPa,  $d_n = 0.00175$  m,  $H_j = 0.191$  m were determined as rational design and mode parameters of the hydroinjector from the condition of the maximum degree of cleaning of the surface from milk deposits after washing  $\chi = 40.1\%$ .

**Key words:** milking parlors, washing system, parameters, research, model.  
**F. 17. Fig. 5. Table. 1. Ref. 20.**

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Бабин Ігор Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Бабин Игорь Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Ihor Babyn** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnitsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnitsia, Ukraine, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).