



UDC 637.115:621.517

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE AIR INJECTOR SYSTEM OPERATING MODES OF THE MILK WASHING SYSTEM

I. Gunko, I. Babyn, V. Pryshliak

### Article info

Received  
07.02.2020

Accepted  
11.03.2020

Vinnitsia  
National  
Agricultural  
University  
3, Sonyachna Str.  
Vinnitsia,  
21008, Ukraine

E-mail:  
[viktor.prishlyak@i.ua](mailto:viktor.prishlyak@i.ua);  
[ihorbabyn@gmail.com](mailto:ihorbabyn@gmail.com)

**Gunko, I., Babyn, I., Pryshliak, V. (2020). Experimental studies of the air injector system operating modes of the milk washing system. Scientific Horizons, 03 (88), 44–53. doi: 10.33249/2663-2144-2020-88-3-44-53.**

*The use of modern methods of efficient purification of milking machines on livestock farms is an important way of improving the quality of milk, in accordance with the sanitary and hygienic standards of its production. In order to improve the quality of washing, we propose to use an injector that performs the function of periodically supplying air into the volume of the milk line, thereby creating significant variations in vacuum pressure and, consequently, a controlled hydraulic shock, the control of which must be carried out using automated milking systems.*

*As a result of scientific experimental research and production verification of the efficiency of functioning, the goal was achieved – to confirm the adequacy of theoretical prerequisites for the design and optimization of operating modes of the air injector of the milking system flushing milking plant and determine its rational dimensional characteristics. In particular, as a result of experimental studies of the modes of operation of the air injector of the milk-washing system of the milking plant, the dependence of the rate of pressure change and change of the degree of purity of the milk line on the working vacuum pressure, the volume flow rate of air through the air injector, the duration of the injection time of the air injector and the duration of the air injection were established. Thus, as the working vacuum pressure increases, the volume flow rate of the air through the air injector and the duration of the pause of the air injector, the rate of change of pressure increases. Conversely, as the duration of the injection of the air injector increases, the rate of pressure change decreases.*

*Experimental studies were carried out at the experimental stand on the basis of a laboratory milking machine with available upper and lower milk ducts with a flushing apparatus manufactured by OJSC “Bratslav”. Solving the compromise problem, which minimizes the value of the rate of change of pressure at the highest value of the degree of purity of the milk line obtained the corresponding rational parameters of the modes of operation of the injector. Prospects for further research are the creation of a production sample of an auto-controlled injector that creates vacuum and hydraulic shock.*

**Key words:** milking machine, flushing system, injector, parameters, experimental studies, frequency.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПОВІТРЯНОГО ІНЖЕКТОРА СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ МОЛОКОПРОВІДІВ ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

I. В. Гунько, І. А. Бабин, В. М. Пришляк  
Вінницький національний аграрний університет,  
вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна

*Застосування сучасних методів ефективного очищення молокопроводів доїльних установок на тваринницьких фермах – це важливий шлях поліпшення якості молока, відповідно до санітарно-*

гігієнічним норм його виробництва. Для поліпшення якості промивки нами запропоновано використовувати інжектор, який виконує функцію періодичної подачі повітря в об'єм молокопроводної лінії, створюючи при цьому значні коливання вакуумметричного тиску і, як наслідок, керований гідроудар, керування якого повинно здійснюватися з використанням автоматизованих систем молочно-доїльного обладнання.

У результаті проведення наукових експериментальних досліджень та виробничої перевірки ефективності функціонування була досягнута мета – підтвердження адекватності теоретичних передумов розробки конструкції та оптимізації режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки і визначення його раціональних розмірних характеристик. Зокрема, в результаті експериментальних досліджень режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки були встановлені залежності швидкості зміни тиску і зміни значення ступеня чистоти молокопроводу від робочого вакуумметричного тиску, об'ємних витрат повітря через повітряний інжектор, тривалості такту вприскування повітряного інжектора і тривалості паузи повітряного інжектора. Так із збільшенням робочого вакуумметричного тиску, об'ємних витрат повітря через повітряний інжектор і тривалості паузи повітряного інжектора швидкість зміни тиску збільшується. І, навпаки, із збільшенням тривалості такту вприскування повітряного інжектора швидкість зміни тиску зменшується.

Експериментальні дослідження проводилися на експериментальному стенді на базі лабораторної доїльної установки із наявними верхнім і нижнім молокопроводами із апаратом промивки виробництва ВАТ «Брацлав». Вирішуючи компромісне завдання, яке зводиться до мінімізації значення швидкості зміни тиску при найбільшому значенні ступеня чистоти молокопроводу, отримані відповідні раціональні параметри режимів роботи інжектора. Перспективами подальших досліджень є створення виробничого зразка інжектора з автоматичним керуванням, який створює коливання вакууму і гідроудар.

**Ключові слова:** доїльна установка, система промивки, інжектор, параметри, експериментальні дослідження, ступень частоти.

### Вступ

Серед показників якості молока, що визначають його технологічні властивості як сировини для подальшої переробки найважливішим є бактеріальна забрудненість (Soj & Mamedova, 2005). Цей показник практично повністю залежить від двох зовнішніх факторів санітарного стану доїльного обладнання та охолодження молока. Молоко від вимені корови проходить через доїльні апарати, молокопровід, молокозбірник і, якщо санітарний стан доїльного обладнання незадовільний, то подальше охолодження забрудненого молока не дасть очікуваних результатів (Tsoi & Mamedova, 2007). Тому застосування сучасних методів ефективного очищення молокопроводів доїльних установок – це важливий шлях поліпшення якості молока.

Аналіз систем промивання (Kartashov et al., 2010) виявив такі тенденції розвитку автоматів промивки: перехід від малоємнісних систем заповнення до ємностей зі збільшеним об'ємом; перехід від непрограмованих до програмованих системам промивання; застосування коркового

потoku миючої рідини; підігрів систем промивання (Ushakov et al., 2014). На даному етапі розвитку доїльного обладнання найбільш перспективними є системи промивки з програмованим автоматом. Вони можуть бути адаптовані до доїльних установок різної конфігурації.

Для поліпшення якості промивки нами запропоновано використовувати інжектор, який виконує функцію періодичної подачі повітря в об'єм молокопроводної лінії, створюючи при цьому значні коливання вакуумметричного тиску і, як наслідок, керований гідроудар. Результати проведених досліджень підтверджують доцільність використання розробленого обладнання для автоматичного визначення забрудненості молокопроводної лінії під час виконання технологічної операції промивки молокопроводних систем. При цьому, встановлена залежність товщини шару молока, що рухається в скляній трубці, від опору фоторезистора, на який потрапляє світло, що частково поглинається шаром молока (Pryshlyak & Babyn, 2019). Керування роботою розробленого інжектора повинно здійснюватися з

використанням автоматизованих систем молочно-доїльного обладнання (Aliyev, 2011; Shevchenko & Aliyev, 2013).

Мета досліджень – провести експериментальні дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки і визначити його раціональні значення.

## Матеріали та методи

Експериментальні дослідження проведені на експериментальному стенді на базі лабораторної доїльної установки із наявними верхнім і нижнім молокопроводами із апаратом промивки виробництва ВАТ «Брацлав». Схема експериментального стенду представлена на рисунку 1.

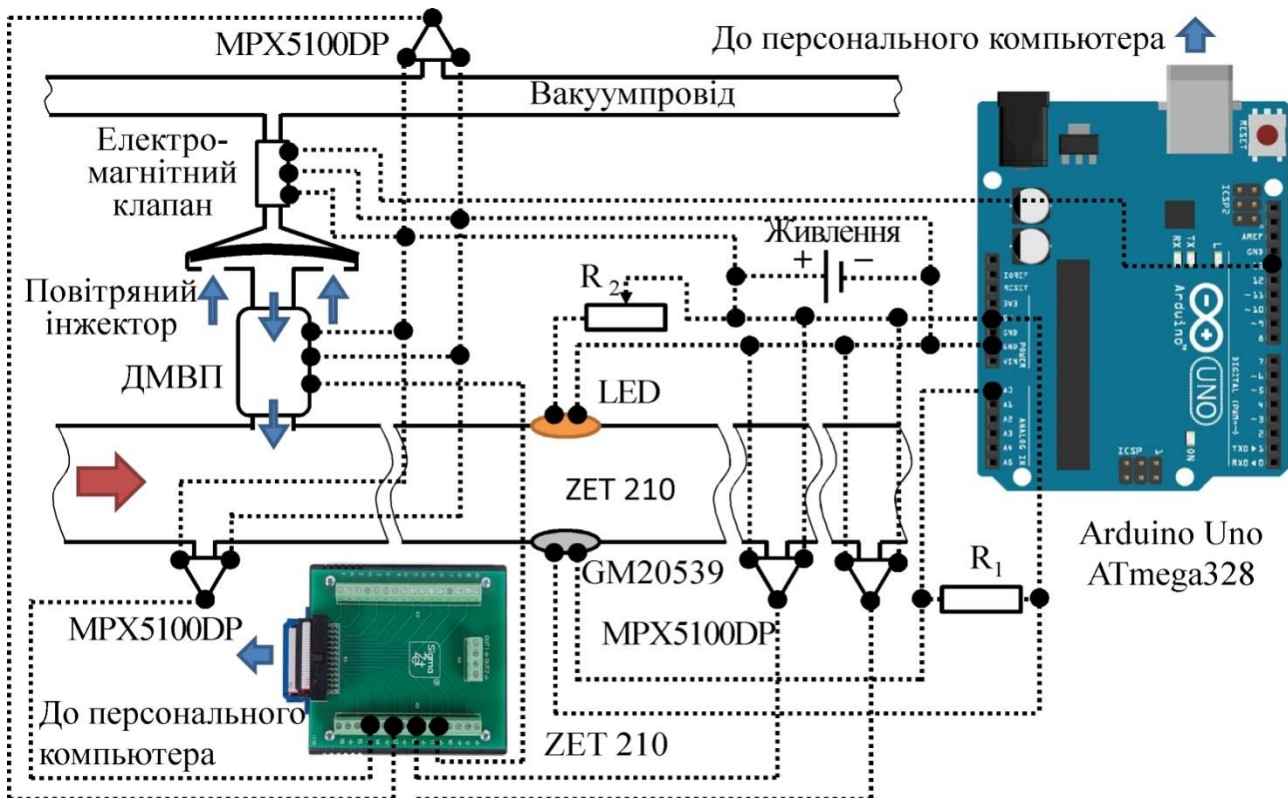


Рис. 1. Схема експериментального стенду для дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки

До складу стенду входить: лабораторна доїльна установка (в тому числі молокопровід і вакуумпровід); повітряний інжектор, електромагнітний клапан; датчик масових витрат повітря ДМВП; чотири датчика вакуумметричного тиску *MPX5100DP*, три з яких розташовані на молокопроводі на відстані 2 м один від одного, а один – на вакуумпроводі, і підключені до модуля АЦП/ЦАП *ZET 210*; фотодатчик визначення забрудненості молокопровідної лінії, який складається зі світлодіода *LED 1W 100 Lm*, фоторезистора *GM20539*, резистора  $R_1=10\text{ k}\Omega$ , підлаштовного резистора  $R_2=5\text{ k}\Omega$ , плати керування *Arduino Uno ATmega328*; блок живлення. Загальний вигляд експериментального стенду представлено на рисунку 2.

Факторами експериментальних досліджень є

робочий вакуумметричний тиск  $p_w$ , тривалість такту вприскування повітряного інжектора  $t_{inj}$ , тривалість паузи повітряного інжектора  $t_p$  і об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_v$ . Межі та інтервали факторів досліджень представлені в табл. 1.

Робочий вакуумметричний тиск  $p_w$  встановлюється на лабораторній доїльній установці з використанням вакуумрегулятора (рис. 3, а) і контролюється датчиком вакуумметричного тиску *MPX5100DP*. Рівняння калібрувальної характеристики датчика вакуумметричного тиску *MPX5100DP* має вигляд (Aliyev, 2012):

$$p = \frac{1}{9} \left( \frac{U_p}{5} - 0,04 \right), \quad (1)$$

де  $U_p$  – напруга з датчика вакуумметричного тиску *MPX5100DP*, В.

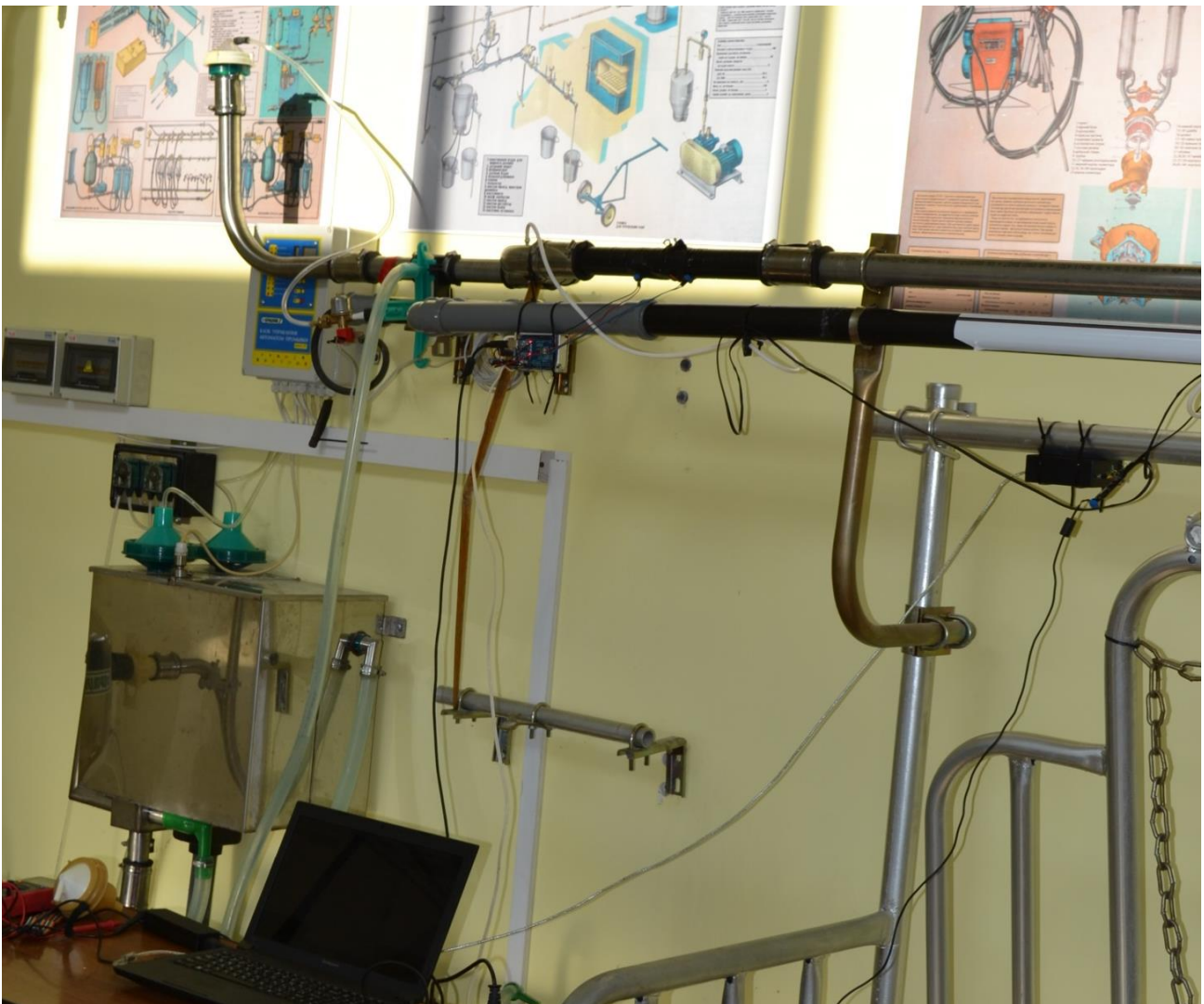


Рис. 2. Загальний вигляд експериментального стенду для дослідження режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки

Таблиця 1. Межі та інтервали факторів експериментальних досліджень

Рівень	Робочий вакуумметричний тиск $p_w$ , кПа ( $x_1$ )	Тривалість такту вприскування повітряного інжектора $t_{inj}$ , с ( $x_2$ )	Тривалість паузи повітряного інжектора $t_p$ , с ( $x_3$ )	Об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор $Q_v$ , л/хв ( $x_4$ )
Верхній (+1)	75	9	9	100
Середній (0)	60	5	5	200
Нижній (-1)	45	1	1	300
Інтервал	15	4	4	100

Похибка вимірювання вакуумметричного тиску в межах досліджуваного діапазону становить  $\pm 0,1$  кПа.

Тривалості тактів вприскування  $t_{inj}$  і паузи  $t_p$  повітряного інжектора встановлюються за допомогою електромагнітного клапана, який



приєднано до плати керування *Arduino Uno ATmega 328*. Похибка тактів впрыскування і паузи складає  $\pm 1$  мс.

Об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_v$  встановлюються шляхом перекривання отворів на повітряному інжекторі і контролюються датчиком масових витрат повітря ДМВП *BOSH 280218037*. Перерахунок масових витрат повітря  $Q_M$  до об'ємних  $Q_v$  здійснюється за наступною формулою:

$$Q_v = \frac{1000}{60} \frac{Q_M}{(101,325 - p_w) \mu_a} R_a T_a, \quad (2)$$

де:  $R_a$  – універсальна газова стала,  
 $R_a = 8,314$  Дж/(моль·К);

$T_a$  – температура повітря, К;

$\mu_a$  – молярна маса повітря,  $\mu_a = 28,96$  г/моль;

$Q_v$  – об'ємні витрати повітря, л/хв.;

$Q_M$  – масові витрати повітря, кг/с (Aliyev, 2012):

$$Q_M = 0,0022U_M + 0,0022U_M - 0,0044, \quad (3)$$

$U_M$  – напруга з датчика масових витрат повітря *BOSH 280218037*, В.

Перед кожним дослідом фотодатчик знімали з лабораторної доїльної установки, промивали, витирали і занурювали у ємність із молоком, де він знаходився впродовж 20 хвилин.

Далі встановлювали фактори досліджень на необхідному рівні і запускали апарат промивки в режимі безперервного промивання впродовж 30 хвилин.

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  $R_f$ .

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

$$\theta_{milk} = 100 \frac{h''_{milk} - h'_{milk}}{h'_{milk}}, \quad (6)$$

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

Відповідно до попередніх лабораторних досліджень (Babyn, 2018) товщина шару молока на стінці труби визначалася з урахуванням

значення опору на фотодатчику за формулою:

$$h_{milk} = \frac{1}{k_{\lambda milk}} \ln \left( \frac{R_f}{R_0} \right), \quad (7)$$

де:  $R_f$  – поточне значення опору на фотодатчику, Ом;  $R_0$  – початкове значення опору на фотодатчику, Ом;  $k_{\lambda milk}$  – показник поглинання світла молоком, який було визначено в результаті лабораторних досліджень (Babyn, 2018), м<sup>-1</sup>.

Також необхідно було встановити значення інтервалу часу  $\Delta t_e$  за який відбувається стабілізація поточного значення опору на фотодатчику. Зазначений інтервал часу  $\Delta t_e$  характеризує мінімально допустимий час промивання молокопроводу доїльної установки.

Критерієм, який обмежує режимні параметри роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки із повітряним інжектором, є значення зміни тиску за час такту впрыскування і паузи повітряного інжектора (швидкість зміни тиску)  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ , яке розраховується за формулою:

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

Окрім зазначеного вище критерію якості важливим є градієнт зміни вакуумметричного тиску, який розраховується за формулою:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{p_3 - p_1}{2l_p}, \quad (9)$$

де  $l_p$  – відстань між датчиками, м.

Чим більше швидкості зміни тиску в молокопроводі доїльної установки, тим більше ймовірність виникнення некерованого гідродудару, який зруйнує не тільки шар молока і молочних відкладень на поверхні стінки молокопроводу, а й сам молокопровід.

Тому раціональні режими роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки із повітряним інжектором можна досягти за умови мінімізації значення товщини шару молока на стінці молокопроводу, мінімально допустимого часу промивання і швидкості зміни тиску.

Експериментальні дослідження проводилися за планом Хартлі–Коно (*Ha-Ko4*) для чотирьох факторів на трьох рівнях із загальною кількістю дослідів – 18 (Kiselev, 2017). Далі, з використанням програмного пакету *Wolfram Mathematica*, визначалася модель регресії другого порядку для кожного із запропонованих критеріїв.

### Результати досліджень та обговорення

В результаті досліджень для кожного досліду отримана динаміка вакуумметричного тиску на кожному з підключених датчиків ( $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ). Дано пояснення щодо процесів, які спостерігаються на відповідних графіках (рис. 3). Під час відкриття повітряного інжектора (тобто сполучання його із атмосферним тиском) відбувається різке падіння вакуумметричного тиску практично до 0 кПа, що спричиняє від'ємний гідроудар. За рахунок постійної роботи

вакуумного насоса і наявності ресивера значення вакуумметричного тиску наближається до робочого  $p_0$  із певними затухаючими коливаннями. Далі повітряний інжектор закривається (різко зникає сполучання із атмосферним тиском), що спричиняє різке підвищення вакуумметричного тиску (практично у два рази) і, відповідно, позитивний гідроудар. За рахунок постійної роботи вакуумного насоса і наявності ресивера значення вакуумметричного тиску вирівнюється до робочого  $p_0$  за функцією затухаючого синуса.

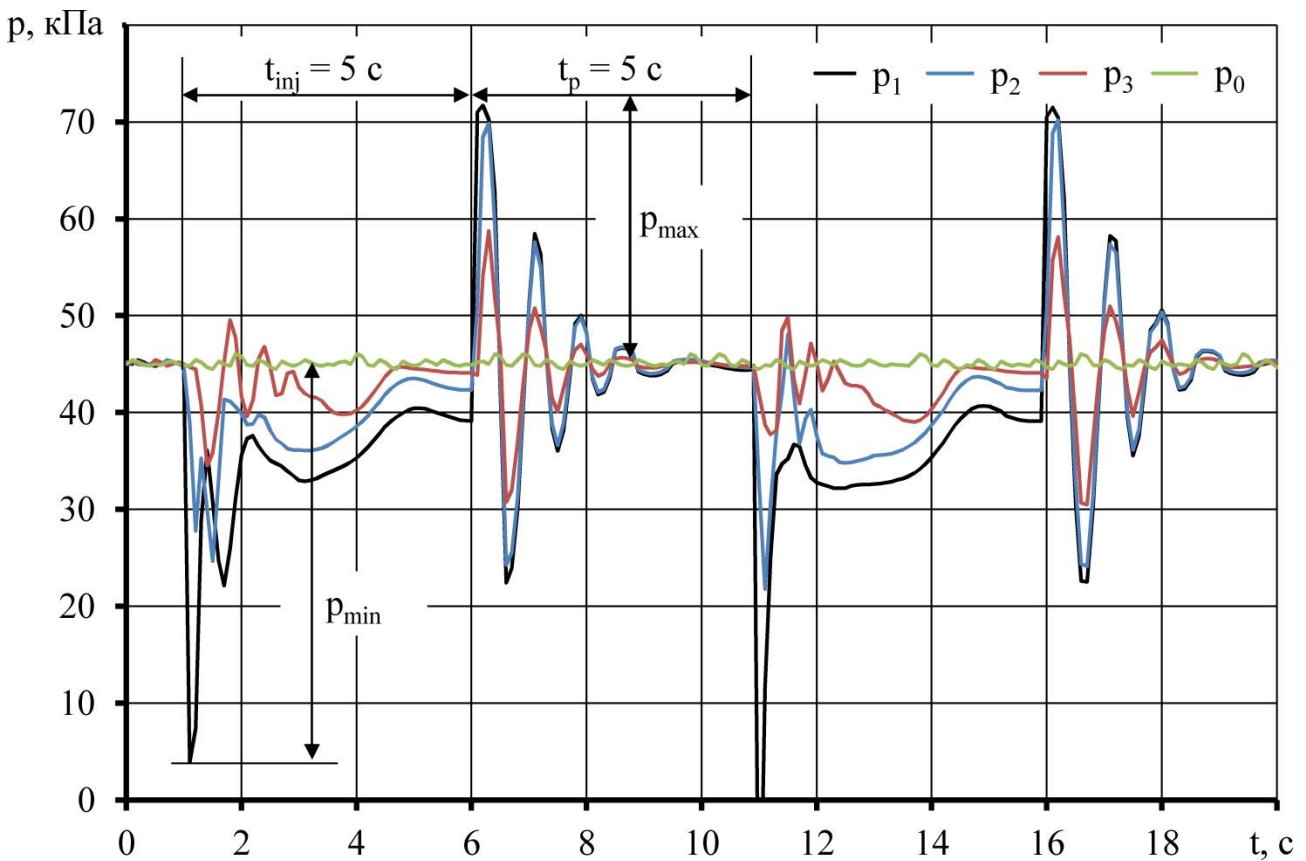


Рис. 3. Динаміка вакуумметричного тиску на підключених датчиків ( $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ )

Динаміка зміни опору на фотодатчику  $R_f$  має характер, який представлено на рисунку 4. Аналізуючи зазначений рисунок, видно, що зниження опору на фотодатчику  $R_f$  від початкового значення до стабілізованого  $R_{fe}$  характеризує ефективний процес промивання, який триває  $t_e - t_s$ . Після стабілізації значення опору на фотодатчику процес промивання є не

ефективним.

Відповідно до плану досліджень розглянемо отримані дані за кожним критерієм окремо.

В результаті експериментальних досліджень і подальшої обробки отриманих даних в програмному пакеті *Wolfram Mathematica* отримана залежність зміни ступеня чистоти  $\theta_{milk}$  від факторів досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \theta_{milk} = & 76,7653 - 6,70752 x_1 - 3,49731 x_1^2 - 1,88824 x_2 - 0,23882 x_1 x_2 - 1,28554 x_2^2 - 3,84884 x_3 + \\ & + 0,340515 x_1 x_3 + 2,07749 x_2 x_3 - 6,23266 x_3^2 + 11,2418 x_4 - 0,107728 x_1 x_4 + 0,0858108 x_2 x_4 + \\ & + 0,592603 x_3 x_4 + 1,10483 x_4^2. \end{aligned} \quad (10)$$



Рис. 4. Динаміка зміни опору на фотодатчику  $R_f$

Статистична обробка рівняння (10) представлена в таблиці 2.

В результаті аналізу таблиці 2, відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм

Стьюдента  $t_{0,05}(36)=2,02$  і розкодування рівняння (10) остаточно маємо залежність зміни значення ступеня чистоти  $\theta_{milk}$  від факторів досліджень:

$$\theta_{milk} = 29,5872 + 1,42395 p_w - 0,0155436 p_w^2 + 0,0640533 Q_V - 0,0000718187 p_w Q_V + 0,000110483 Q_V^2 - 0,121902 t_{inj} - 0,00398034 p_w t_{inj} + 0,000214527 Q_V t_{inj} - 0,080346 t_{inj}^2 + 1,64717 t_p + 0,00567526 p_w t_p + 0,00148151 Q_V t_p + 0,129843 t_{inj} p - 0,389542 t_p^2. \quad (11)$$

Згідно з розрахованим критерієм Фішера для рівняння (11)  $F=1,96 > F_{0,05}(8;36)=2,21$ . Це свідчить, що між розрахованими за рівнянням (11) і експериментальними даними немає

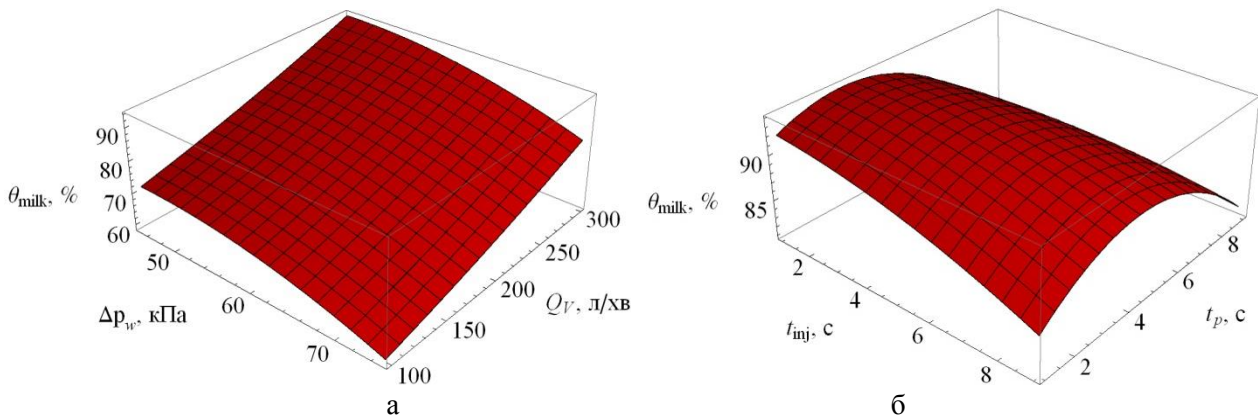
істотних статистичних відмінностей і нульова гіпотеза про рівність вибірок розрахункових і експериментальних даних підтверджується, тобто математична модель (11) є адекватною.

Таблиця 2. Статистична обробка рівняння (10)

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії	Стандартна похибка	t-statistic	P-Value
a <sub>00</sub>	76,7653	0,478921	160,288	5,35434 · 10 <sup>-7</sup>
a <sub>10</sub>	-6,70752	0,405545	-16,5395	0,000481078
a <sub>20</sub>	-1,88824	0,288735	-6,53971	0,00726768
a <sub>30</sub>	-3,84884	0,226625	-16,9833	0,000444643
a <sub>40</sub>	11,2418	0,227416	49,4327	0,0000182301
a <sub>12</sub>	-0,23882	0,380664	-0,627378	0,574915
a <sub>13</sub>	0,340515	0,252094	1,35075	0,269627
a <sub>14</sub>	-0,107728	0,242665	-0,443938	0,687156
a <sub>23</sub>	2,07749	0,290825	7,14344	0,00564843
a <sub>24</sub>	0,0858108	0,24597	0,348867	0,750238
a <sub>34</sub>	0,592603	0,260907	2,27132	0,107794
a <sub>11</sub>	-3,49731	0,592834	-5,8993	0,00972467
a <sub>22</sub>	-1,28554	0,459157	-2,79977	0,0678657
a <sub>33</sub>	-6,23266	0,622532	-10,0118	0,00212106
a <sub>44</sub>	1,10483	0,380872	2,9008	0,0624616
a <sub>00</sub>	76,7653	0,478921	160,288	5,35434 · 10 <sup>-7</sup>

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

Фіксуючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовано графічні інтерпретації залежності (4), які зображені на рис. 5.



**Рис. 5. Залежність значення ступеня чистоти молокопроводу  $\theta_{milk}$  від факторів досліджень:**  
а – робочий вакууметричний тиск  $p_w$  і об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_V$ ;  
б – тривалість такту вприскування повітряного інжектора  $t_{inj}$  і тривалість паузи повітряного інжектора  $t_p$

Аналіз рисунку 5 і залежності (11) дає змогу стверджувати про варіативність режимів роботи інжектора. Так, із збільшенням робочого вакууметричного тиску  $p_w$  і об'ємних витрат повітря через повітряний інжектор  $Q_V$ , ступінь чистоти молокопроводу  $\theta_{milk}$  збільшується. Зазначене спостереження є досить логічним, так як збільшується взаємодія ударної хвилі, що виникає внаслідок пульсацій вакууметричного тиску, із шаром молока на стінках молокопроводу. Для тривалості тактів вприскування  $t_{inj}$  і паузи  $t_p$  повітряного інжектора спостерігається оптимум за якого ступінь чистоти молокопроводу  $\theta_{milk}$  є максимальним. При найменших значеннях

тактів швидкість розповсюдження ударної хвилі є високою, що призводить до зменшення швидкості її взаємодії із шаром молока на стінках молокопроводу. При найбільших значеннях тактів величина ударної хвилі є не великою, що призводить до менш руйнівної дії на шар молока, який розміщено на стінках молокопроводу.

В результаті експериментальних досліджень і подальшої обробки отриманих даних в програмному пакеті *Wolfram Mathematica* отримана залежність зміни тиску за час такту вприскування і паузи повітряного інжектора (швидкість зміни тиску) від факторів досліджень у закодованому вигляді:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = 34,494 + 3,65198x_1 - 2,6524x_1^2 - 12,1905x_2 - 3,02649x_1x_2 + 12,738x_2^2 - 8,07975x_3 - 1,6205x_1x_3 + 12,9931x_2x_3 - 0,878323x_3^2 + 14,5057x_4 - 0,170093x_1x_4 + 0,144456x_2x_4 + 0,286004x_3x_4 + 0,370808x_4^2. \quad (12)$$

Статистична обробка рівняння (12) представлена в таблиці 3. В результаті аналізу таблиці 3, відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм

Стьюдента  $t_{0,05}(36) = 2,02$  і розкодування рівняння (12) остаточно маємо залежність швидкості зміни тиску від факторів досліджень:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = -9,25598 + 2,04533p_w - 0,0117884p_w^2 + 0,145057Q_V - 12,0428t_{inj} - 0,0504414p_w t_{inj} + 0,796128t_{inj}^2 - 4,45978t_p - 0,0270083p_w t_p + 0,812068t_{inj} t_p. \quad (13)$$

Згідно за розрахованим критерієм Фішера для рівняння (13)  $F=1,08 > F_{0,05}(8;36)=2,21$ . Це свідчить, що між розрахованими за рівнянням (13) і експериментальними даними немає

істотних статистичних відмінностей і нульова гіпотеза про рівність вибірок розрахункових і експериментальних даних підтверджується, тобто математична модель (13) є адекватною.



Таблиця 3. Статистична обробка рівняння (12)

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії	Стандартна похибка	t-statistic	P-Value
a <sub>00</sub>	34,494	0,335887	102,695	2,0355·10 <sup>-6</sup>
a <sub>10</sub>	3,65198	0,284426	12,8398	0,0010195
a <sub>20</sub>	-12,1905	0,202502	-60,1996	0,0000100985
a <sub>30</sub>	-8,07975	0,158942	-50,8347	0,0000167643
a <sub>40</sub>	14,5057	0,159496	90,9474	2,93029·10 <sup>-6</sup>
a <sub>12</sub>	-3,02649	0,266975	-11,3362	0,00147243
a <sub>13</sub>	-1,6205	0,176804	-9,16549	0,00274598
a <sub>14</sub>	-0,170093	0,170191	-0,999427	0,391239
a <sub>23</sub>	12,9931	0,203968	63,7017	8,52378·10 <sup>-6</sup>
a <sub>24</sub>	0,144456	0,172509	0,837382	0,463839
a <sub>34</sub>	0,286004	0,182985	1,56299	0,215996
a <sub>11</sub>	-2,6524	0,415779	-6,37935	0,00779828
a <sub>22</sub>	12,738	0,322026	39,5559	0,0000355498
a <sub>33</sub>	-0,878323	0,436608	-2,0117	0,137757
a <sub>44</sub>	0,370808	0,267121	1,38816	0,259212
a <sub>00</sub>	34,494	0,335887	102,695	2,0355·10 <sup>-6</sup>

Мінімальне значення швидкості зміни тиску  $\frac{\Delta p}{\Delta t} = 6,93 \text{ кПа/с}$  досягається при  $p_w = 45 \text{ кПа}$ ,  $\Delta t = 4,39 \text{ с}$ ,  $t_p = 1,0 \text{ с}$ ,  $Q_V = 100 \text{ л/хв}$ . Фіксуючи

почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовані на рис. 6, графічні інтерпретації залежності (13).

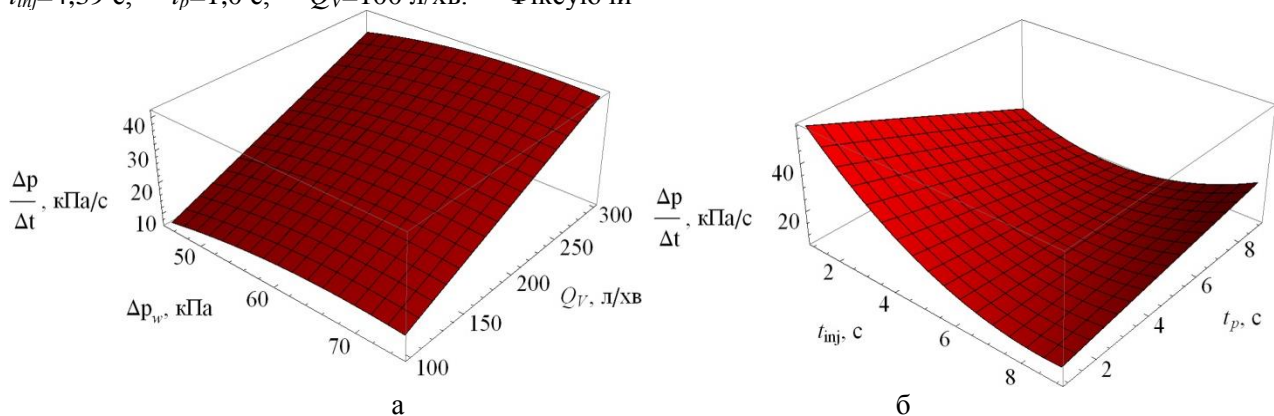


Рис. 6. Залежність значення швидкості зміни тиску  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$  від факторів досліджень:

- а** – робочий вакуумметричний тиск  $p_w$  і об'ємні витрати повітря через повітряний інжектор  $Q_V$ ;  
**б** – тривалість такту вприскування повітряного інжектора  $t_{inj}$  і тривалість паузи повітряного інжектора  $t_p$

Із збільшенням робочого вакуумметричного тиску  $p_w$ , об'ємних витрат повітря через повітряний інжектор  $Q_V$  і тривалості паузи повітряного інжектора  $t_p$  швидкість зміни тиску збільшується. І навпаки із збільшенням тривалості такту вприскування повітряного інжектора  $t_{inj}$  швидкість зміни тиску зменшується. Останнє пояснюється рисунком 3.

В зв'язку з тим, що раціональні параметри (11) і (13) відрізняються, то необхідно вирішити компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації значення швидкості зміни тиску при найбільшому значенні ступеня чистоти молокопроводу:

$$\begin{cases} \theta_{milk}(p_w, t_{inj}, t_p, Q_V) \text{ ® max,} \\ \frac{\Delta p}{\Delta t}(p_w, t_{inj}, t_p, Q_V) \text{ ® min.} \end{cases} \quad (14)$$

Вирішуючи систему рівнянь (14) в програмному пакеті *Wolfram Mathematica* отримуємо раціональні параметри режимів роботи інжектора:

$$p_w=45,0 \text{ кПа}, t_{inj}=5,2 \text{ с}, t_p=4,2 \text{ с}, Q_v=295 \text{ л/хв.},$$

$$\theta_{milk}=92,1 \%, \frac{\Delta p}{\Delta t}=42,4 \text{ кПа/с}. \quad (15)$$

### Висновки

В результаті експериментальних досліджень режимів роботи повітряного інжектора системи промивання молокопроводів доїльної установки було встановлено залежності швидкості зміни тиску  $\Delta P/\Delta t$  і зміни значення ступеня чистоти молокопроводу  $\theta_{milk}$  від робочого вакуумметричного тиску  $p_w$ , об'ємних витрат повітря через повітряний інжектор  $Q_v$ , тривалості такту вприскування повітряного інжектора  $t_{inj}$  і тривалості паузи повітряного інжектора  $t_p$ .

Вирішуючи компромісне завдання, яке зводиться до мінімізації значення швидкості зміни тиску за найбільшого значення ступеня чистоти молокопроводу отримані відповідні раціональні параметри режимів роботи інжектора:  $p_w=45,0$  кПа,  $t_{inj}=5,2$  с,  $t_p=4,2$  с,  $Q_v=295$  л/хв.,  $\theta_{milk}=92,1$  %,  $\Delta P/\Delta t=42,4$  кПа/с.

### References

- Aliiev, E. B. (2011). Optymizatsiia tekhniko-tekhnolohichnykh parametriv vakuumnoi systemy doilnoi ustanovky [Optimization of technical and technological parameters of the milking machine vacuum system]. *Zbirnyk naukovykh prats Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 12 (1). 138–147. doi: 10.31388/2078-0877-19-3-14-21 [in Ukrainian].
- Aliiev, E. B. (2012). Doslidzhennia metrolohichnykh kharakterystyk komplektu ustatkuvannia kontroliu vakuumetrychnykh parametriv molochno-doilnoho obladnannia [Investigation of metrological characteristics of a set of equipment for monitoring the vacuum parameters of milking and milking equipment]. *Ahrarna nauka ta praktyka na suchasnomu etapi rozvytku: dosvid, problemy ta shliakhy yikh vyrishennia*, Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (pp. 13–15). Lviv : Lvivska ahrarna fundatsiia [in Ukrainian].
- Babyn, I. A. (2019). Fyzyko-matematychnyi aparat rukhu dvofaznogo myiuchoho rozchynu po molokoprovodnii linii [Physico-mathematical apparatus for the movement of a two-phase detergent solution along a milk line]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1 (104), 5–12. doi: 10.37128/2520-6168-2019-1-1 [in Ukrainian].
- 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 intensyfikacii produkcji zwierzeczej z uwzględnieniem ochrony srodowiska i standardow UE*. (pp. 355–359). Warszawa.
- Kartashov, L. P., Ushakov Yu. A., Kolkpakov, A. V., Korolev, A. S., Panin, A. A. & Vasilevsky, G. P. (2010). Inzhenernyye metody obespecheniya kachestva moloka [Engineering methods to ensure the quality of milk]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, 84, 26–29 [in Russian].
- Kyselov, O. V., Komarova, I. B., Milko, D. O. & Bakardzhyiev, R. O. (2017). Statystychna obrobka i oformlennia rezultativ eksperymentalnykh doslidzhen (iz dosvidu napysannia dysertatsiinykh robit) [Statistical processing and design of experimental research results (from the experience of writing dissertation papers)]. *Zaporizhzhia : STATUS* [in Ukrainian].
- Pryshliak, V. M. & Babyn, I. A. (2019). Rezultaty doslidzhen fotodatchyka vyznachennia zabrudnenosti molokoprovodnoi linii [Research results of the photodetector for determining the contamination of the mammalian line]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 49, 206–212. doi: 10.32515/2414-3820.2019.49.206-212 [in Ukrainian].
- Shevchenko, I. A. & Aliiev, E. B. (2013). Naukovo-metodychni rekomendatsii z bahatokryterialnogo vyrobnychoho kontroliu doilnykh ustanovok [Scientific and methodological recommendations for multicriteria production control of milki]. *Zaporizhzhia : Aktsent Invest-treid* [in Ukrainian].
- Tsoi, Y. A. & Mamedova, R. A. (2007). Parametry probkovogo rezhima techeniya zhidkosti v molokoprovode pri promyvkе [Parameters of the cork mode of fluid flow in the milk duct during washing]. *Tekhnika v selskom khozyaystve*, 2, 3–4 [in Russian].
- Ushakov, Yu. A., Terekhov, O. N., Vasilevsky, G. P. & Danilova, N. G. (2014). Sokhraneniye kachestva moloka inzhenernymi metodami [Preservation of milk quality by engineering methods]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 5, 53–56 [in Russian].