

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ МОЛОКОПРОВІДІВ МОЛОЧНО-ДОЇЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ІЗ ПОВІТРЯНИМ ІНЖЕКТОРОМ

В. М. Пришляк, кандидат технічних наук, доцент

ORCID ID: 0000-0001-6992-9211

І. А. Бабин, асистент

ORCID ID: 0000-0002-7070-4957

І. В. Гунько, кандидат технічних наук, доцент

ORCID ID: 0000-0001-5470-7413

Вінницький національний аграрний університет

У результаті чисельного моделювання процесу промивання молокопровідного обладнання встановлено залежності швидкості зміни тиску і зміни значення товщини шару молока на стінці молокопроводу за різних значень його діаметру від робочого вакуумметричного тиску, тривалості такту вприскування повітряного інжектора і тривалості паузи повітряного інжектора. Вирішуючи компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації значення товщини шару молока на стінці молокопроводу і швидкості зміни тиску для різних значень діаметра молокопроводу, отримано відповідні раціональні параметри режимів роботи інжектора.

Ключові слова: доїльна установка, система промивки, миючий розчин, багатофазне середовище, чисельне моделювання.

Постановка проблеми. Під час експлуатації молокопроводів молочно-доїльного обладнання на їх внутрішніх поверхнях утворюються різноманітні за властивостями, складом і товщиною молочні відкладення. Їх наявність призводить до збільшення бактеріального забруднення молока [1, 2]. Основна частка механічних і бактеріальних забруднень молока при дотриманні всіх необхідних умов утримання тваринницьких приміщень формується за рахунок недостатньо промитого молочно-доїльного обладнання [3]. Тому застосування сучасних методів ефективного очищення молокопроводів молочно-доїльного обладнання – це важливий шлях поліпшення якості молока і підвищення продуктивності праці в молочному тваринництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений ретроспективний, всебічний, широкомасштабний, системний аналіз наукових результатів вітчизняних і закордонних досліджень (у тому числі доїльне обладнання компанії DeLaval) показав, що існують деякі цікаві рішення проблеми очищення молокопроводів доїльного обладнання з метою підвищення якості молока й підвищення санітарно-гігієнічних норм тваринництва у цілому [4, 5].

Ефективність промивки залежить від комплексного впливу таких факторів, як темпера-

тура, швидкість течії миючого розчину, його концентрація, тривалість циркуляції тощо [6]. Проведені дослідження [6, 8, 9] даних показників технологічного режиму промивки неоднозначні, при цьому ряд рекомендованих значень параметрів або не можуть бути отримані, або неприйнятні при обслуговуванні молочно-доїльного обладнання. Тому режими і параметри промивки молокопроводів молочно-доїльного обладнання для цієї задачі вимагають обґрунтування.

Для поліпшення якості промивки нами запропоновано використовувати інжектор, який виконує функцію періодичної подачі повітря в об'єм молокопровідної лінії, створюючи при цьому значні коливання вакуумметричного тиску і як наслідок – керований гідроудар, керування яким повинно здійснюватися з використанням автоматизованих систем [10] молочно-доїльного обладнання [11, 12].

Мета досліджень. Використовуючи науково-методологічні прийоми чисельного моделювання визначити раціональні значення режимів роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльної установки, обладнаної інноваційним повітряним інжектором, зокрема залежність швидкості зміни тиску і зміни значення товщини шару молока на стінці молокопроводу за різних значень його діаметру від робочого вакуум-

метричного тиску, тривалостей такту вприскування повітряного інжектора і паузи повітряного інжектора під час технологічного процесу доїння корів.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження процесу роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором проведено на основі чисельного моделювання в програмному пакеті STAR-CCM+ [6, 7]. Схему чисельного досліджу

представлено на рис. 1. Молокопровідна лінія доїльної установки представляє собою прямолінійну горизонтальну трубу діаметром $D_m=50$ мм і довжиною $L=5$ м. З правої сторони зверху встановлений інжектор діаметром $D_m=5$ мм. Сітку континуума молокопровідної лінії доїльної установки було сформовано на основі генератора поверхневої сітки і генератора багатограничних комірок. При цьому базовий розмір сітки склав 0,001 м.

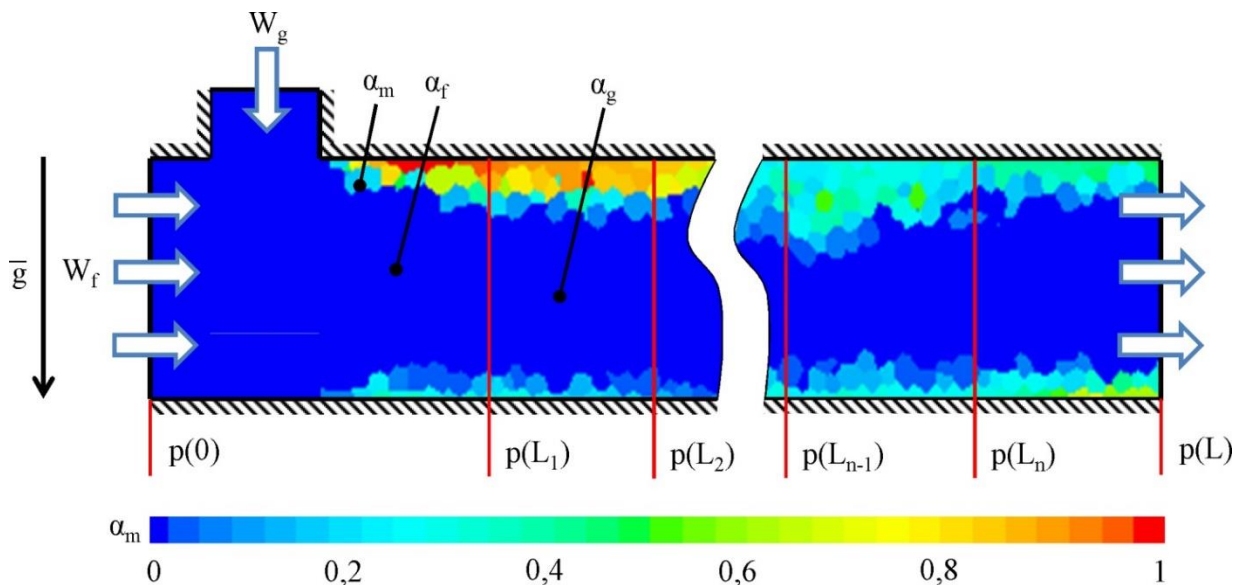


Рис. 1. Схема чисельного дослідження процесу руху багатофазного середовища по горизонтальній молокопровідній лінії доїльної установки

Чисельне моделювання було проведено на основі таких фізичних моделей: багатофазна взаємодія, ізотермічне рівняння енергії рідини, поле сили тяжіння, $k-\epsilon$ модель турбулентності, усереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, багатофазне рівняння стану, об'єм рідини (VOF), Ейлерова багатофазність.

Було прийнято, що миючий розчин в процесі руху мав постійну щільність $\rho_f=997,6$ кг/м³, динамічна в'язкість складала $\mu_f=8,88 \cdot 10^{-4}$ Па*с. Молоко також в процесі руху мало постійну щільність $\rho_m=1027$ кг/м³, його динамічна в'язкість складала $\mu_m=2,72 \cdot 10^{-3}$ Па*с. Повітря підпорядковувалося рівнянням ідеального газу. Динамічна в'язкість повітря складала $\mu_g=1,85 \cdot 10^{-5}$ Па*с, молекулярна маса 28,9 кг/моль [9].

У початковий момент часу було прийнято, що весь об'єм горизонтальної прямолінійної молокопровідної лінії був заповнений молоком, тобто $\alpha_m=100$ %. При цьому вакуумметричний тиск склав $p=45$ кПа. Далі на лівій границі було реалізовано масовий потік повітря $W_f=0,001$ кг/с, на правій – сталий вакуумметричний тиск

$p(L)=45$ кПа, а патрубок інжектора був повністю закритий.

Через 16 с (час підбирався з умови стабілізації вмісту молока і повітря в об'ємі молокопровідної лінії) потік повітря припинявся. А замість нього на лівій границі було реалізовано масовий потік миючого розчину $W_f=0,2$ кг/с.

Починаючи з 17 с інжектор періодично закривається (1 с і 9 с) і відкривається (1 с і 9 с), сполучаючи при цьому внутрішній об'єм молокопровідної суміші з атмосферним тиском і впускаючи повітря в молокопровідну лінію.

Факторами досліджень були діаметр молокопроводу D_m , робочий вакуумметричний тиск p_w , тривалість такту вприскування повітряного інжектору t_{inj} , тривалість паузи повітряного інжектору t_p . Межі та інтервали факторів досліджень представлено в табл. 1.

У процесі чисельного моделювання визначали динаміку вакуумметричного тиску на відстані від лівої границі ($p(0$ м), $p(1$ м), $p(2$ м), $p(3$ м), $p(4$ м), $p(5$ м)) і динаміку вмісту компонентів багатофазного середовища (миючий розчин α_f , повітря α_g , молоко α_m).

Таблиця 1

Межі та інтервали факторів чисельного моделювання

Рівень	Діаметр молокопроводу D_m , мм (x_1)	Робочий вакуумметричний тиск p_w , кПа (x_2)	Тривалість такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} , с (x_3)	Тривалість паузи повітряного інжектору t_p , с (x_4)
Верхній (+1)	70	75	9	9
Середній (0)	60	60	5	5
Нижній (-1)	50	45	1	1
Інтервал	10	15	4	4

Якісним критерієм оцінки досліджень режимів роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором є середнє значення товщини шару молока на стінці труби h_m , яке визначалося за формулою

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

Чим менше значення товщина шару молока на стінці молокопроводу h_m , тим більш якісніше був проведений процес промивання.

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

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_{max} - p_{min}}{t_{inj} + t_p} \quad (2)$$

Чим більше швидкості зміни тиску в молокопроводній лінії молочно-доїльного обладнання, тим більше ймовірність виникнення некерованого гідродару, який зруйнує не тільки шар молока і молочних відкладень на поверхні стінки молокопроводу, а й сам молокопровід.

Тому раціональні режими роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором можна досягти за умови мінімізації значення товщина шару молока на стінці молокопроводу і швидкості зміни тиску.

Моделювання проводилося шляхом почергового перебору всіх рівнів факторів із загальною кількістю $3^4=81$ дослід. Далі з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica визначалася модель регресії другого порядку для кожного запропонованих критеріїв.

Результати досліджень. У результаті чисельного моделювання і подальшої обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Mathematica отримана залежність зміни значення товщина шару молока від факторів досліджень в закодованому вигляді

$$h_m = 0,337492 + 0,0816377x_1 + 0,0609942x_1^2 + 0,00981812x_2 - 0,0732213x_1x_2 + 0,0305382x_2^2 + 0,0274136x_3 + 0,00457199x_1x_3 + 9,09953 \cdot 10^{-6}x_2x_3 + 0,0457208x_3^2 + 0,0731846x_4 + 0,0122056x_1x_4 + 0,000024347x_2x_4 - 0,0182404x_3x_4 + 0,061028x_4^2 \quad (3)$$

Статистична обробка рівняння (3) представлена в таблиці 2.

Таблиця 2

Статистична обробка рівняння (3)

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії	Стандартна похибка	t-statistic	P-Value
a_{00}	0,337492	0,00272132	124,018	$6,38376 \cdot 10^{-80}$
a_{10}	0,0816377	0,00111097	73,4831	$4,96084 \cdot 10^{-65}$
a_{20}	0,00981812	0,00111097	8,8374	$8,4597 \cdot 10^{-13}$
a_{30}	0,0274136	0,00111097	24,6753	$4,93061 \cdot 10^{-35}$
a_{40}	0,0731846	0,00111097	65,8743	$6,12415 \cdot 10^{-62}$
a_{12}	- 0,0732213	0,00136066	- 53,8132	$3,0103 \cdot 10^{-56}$
a_{13}	0,00457199	0,00136066	3,36013	0,00129839
a_{14}	0,0122056	0,00136066	8,97038	$4,90858 \cdot 10^{-13}$
a_{23}	$9,09953 \cdot 10^{-6}$	0,00136066	0,00668759	0,994684
a_{24}	0,000024347	0,00136066	0,0178935	0,985778
a_{34}	- 0,0182404	0,00136066	- 13,4055	$1,64895 \cdot 10^{-20}$
a_{11}	0,0609942	0,00192426	31,6974	$1,17348 \cdot 10^{-41}$
a_{22}	0,0305382	0,00192426	15,8701	$3,24016 \cdot 10^{-24}$
a_{33}	0,0457208	0,00192426	23,7602	$4,65679 \cdot 10^{-34}$
a_{44}	0,061028	0,00192426	31,715	$1,13378 \cdot 10^{-41}$

У результаті аналізу даних таблиці 2, відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів і розкодування рівняння (3) остаточно маємо залежність зміни значення товщина шару молока від факторів досліджень

$$h_m = 0,87386 - 0,0378379D_m + 0,000609942D_m^2 + 0,013656p_w - 0,000488142D_m p_w + 0,000135725p_w^2 - 0,02288t_{inj} + 0,0001143D_m t_{inj} + 0,00285755t_{inj}^2 - 0,0324547t_p + 0,000305141D_m t_p - 0,00114002t_{inj} t_p + 0,00381425t_p^2. \quad (4)$$

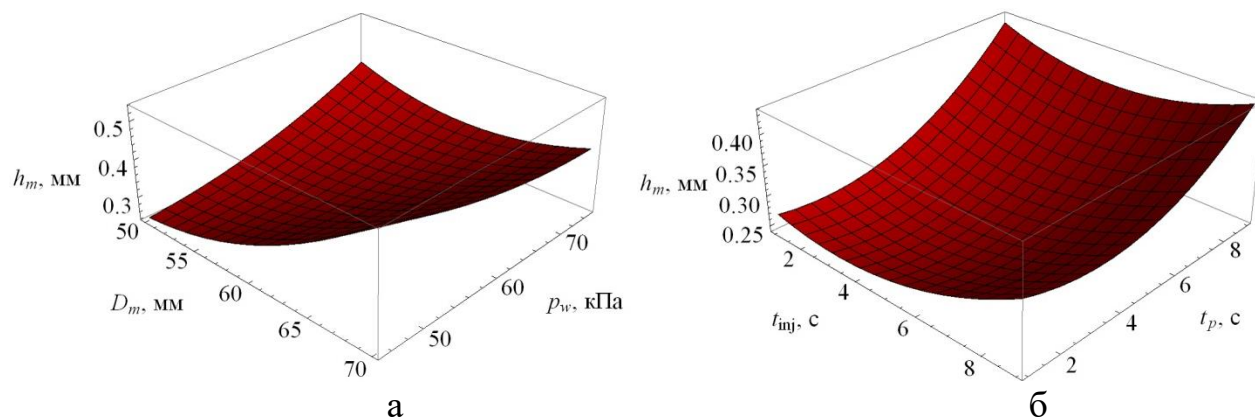


Рис. 2. Залежність значення товщини шару молока на стінці молокопроводу h_m від факторів досліджень: а – діаметру молокопроводу D_m і робочого вакууметричного тиску p_w ; б – тривалості такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p

Фіксуючи значення діаметра молокопроводу D_m на рівнях 50 мм, 60 мм і 70 мм отримуємо раціональні значення інших факторів при умові мінімізації товщини шару молока:

$$h_m(D=50\text{мм}, p_w=45\text{кПа}, t_{inj}=3,55\text{с}, t_p=2,78\text{с})=0,243\text{мм},$$

$$h_m(D=60\text{мм}, p_w=57,5\text{кПа}, t_{inj}=3,27\text{с}, t_p=2,34\text{с})=0,306\text{мм},$$

$$h_m(D=70\text{мм}, p_w=74,9\text{кПа}, t_{inj}=2,98\text{с}, t_p=1,90\text{с})=0,406\text{мм}. \quad (5)$$

Відповідна графічна інтерпретація залежності (4) при умовах (5) представлена на рис. 3.

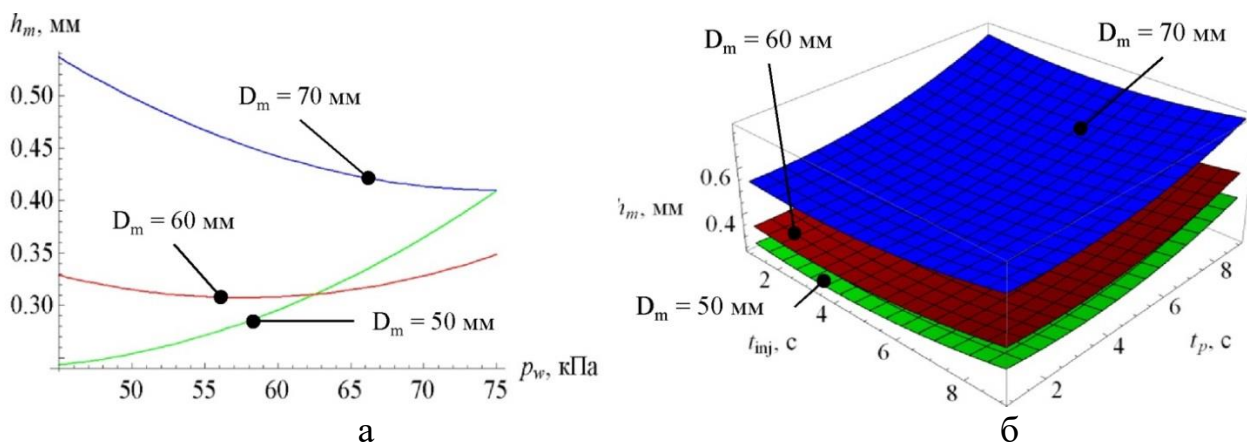


Рис. 3. Залежність значення товщини шару молока на стінці молокопроводу h_m за різних значень його діаметру D_m від факторів досліджень: а – робочого вакууметричного тиску p_w ; б – тривалості такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p

Аналіз рисунків 2 та 3 і залежності (5) дає змогу стверджувати про варіативність режимів роботи інжектора. Чим більший діаметр

молокопроводу застосований у молочно-доїльному обладнанні, тим більший вакууметричний тиск необхідно створювати для

забезпечення якісного очищення його стінок від залишків молока. При цьому тривалість такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p повинні знаходитися в межах 2,9-3,6 с і 1,9-2,8 с відповідно.

В результаті чисельного моделювання 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 в закодованому вигляді

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = 19,0753 - 2,26911x_1 - 4,90715 \cdot 10^{-14}x_1^2 + 3,7816x_2 - 7,99361 \cdot 10^{-15}x_1x_2 - 1,71746x_2^2 - 20,2799x_3 + 2,36848 \cdot 10^{-15}x_1x_3 - 4,42461x_2x_3 + 16,1687x_3^2 - 9,10255x_4 + 1,77636 \cdot 10^{-15}x_1x_4 - 2,65746x_2x_4 + 14,8132x_3x_4 - 1,39624x_4^2 \quad (6)$$

Статистична обробка рівняння (6) представлена в таблиці 3.

Таблиця 3

Статистична обробка рівняння (6)

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії	Стандартна похибка	t-statistic	P-Value
a ₀₀	19,0753	2,61737	7,28796	4,97078·10 ⁻¹⁰
a ₁₀	-2,26911	1,06854	-2,12356	0,0374594
a ₂₀	3,7816	1,06854	3,53904	0,000741245
a ₃₀	-20,2799	1,06854	-18,9791	1,96503·10 ⁻²⁸
a ₄₀	-9,10255	1,06854	-8,5187	3,12889·10 ⁻¹²
a ₁₂	-7,99361·10 ⁻¹⁵	1,30869	-6,10812·10 ⁻¹⁵	1
a ₁₃	2,36848·10 ⁻¹⁵	1,30869	1,80981·10 ⁻¹⁵	1
a ₁₄	1,77636·10 ⁻¹⁵	1,30869	1,35736·10 ⁻¹⁵	1
a ₂₃	-4,42461	1,30869	-3,38096	0,00121742
a ₂₄	-2,65746	1,30869	-2,03064	0,0463243
a ₃₄	14,8132	1,30869	11,3191	4,13002·10 ⁻¹⁷
a ₁₁	-4,90715·10 ⁻¹⁴	1,85076	-2,65142·10 ⁻¹⁴	1
a ₂₂	-1,71746	1,85076	-0,927976	0,356801
a ₃₃	16,1687	1,85076	8,73622	1,28081·10 ⁻¹²
a ₄₄	-1,39624	1,85076	-0,754414	0,453284

У результаті аналізу таблиці 3, відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів і розкодування рівняння (6) остаточно маємо залежність швидкості зміни тиску від факторів досліджень:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = 37,6294 - 0,226911D_m + 1,75826p_w - 0,00763316p_w^2 - 15,3799t_{inj} - 0,0737435p_w t_{inj} + 1,01054t_{inj}^2 - 3,37464t_p - 0,0442911p_w t_p + 0,925824t_{inj}t_p - 0,0872651t_p^2 \quad (7)$$

Мінімальне значення швидкості зміни тиску $\frac{\Delta p}{\Delta t} = 1,81$ кПа/с досягається при $D=70$ мм, $p_w=45$ кПа, $t_{inj}=8,79$ с, $t_p=1,0$ с. Фіксуючи почергово фактори досліджень на зазначеному рівні, побудовані на рис. 4, графічні інтерпретації залежності (7).

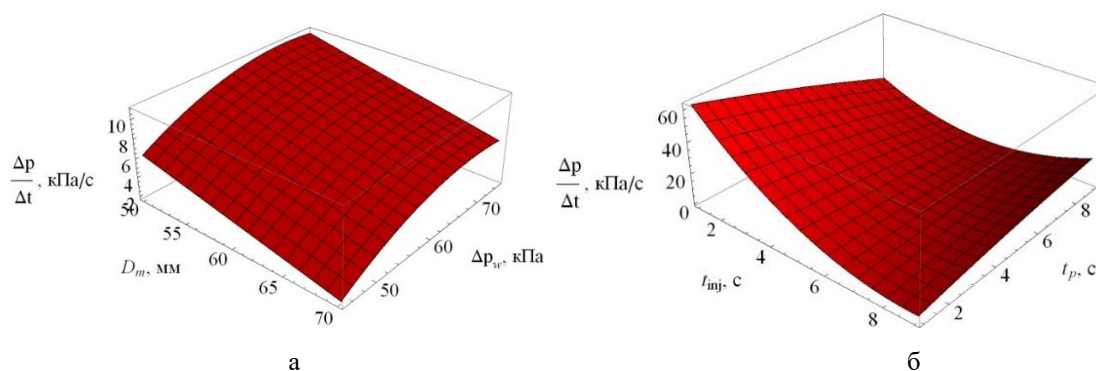


Рис. 4. Залежність значення швидкості зміни тиску $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ від факторів досліджень: а – діаметру молокопроводу D_m і робочого вакуумметричного тиску p_w ; б – тривалості такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p

Фіксуючи значення діаметра молокопроводу D_m на рівнях 50 мм, 60 мм і 70 мм, отримуємо раціональні значення інших факторів за умови мінімізації швидкості зміни тиску:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t}(D=50\text{мм}, p_w=75\text{кПа}, t_{inj}=6,22\text{с}, t_p=9,0\text{с})=8,73\text{кПа/с},$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta t}(D=60\text{мм}, p_w=75\text{кПа}, t_{inj}=6,22\text{с}, t_p=9,0\text{с})=6,47\text{кПа/с},$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta t}(D=70\text{мм}, p_w=75\text{кПа}, t_{inj}=6,22\text{с}, t_p=9,0\text{с})=4,2\text{кПа/с} \quad (8)$$

Відповідна графічна інтерпретація залежності (7) при умовах (8) представлена на рис. 5.

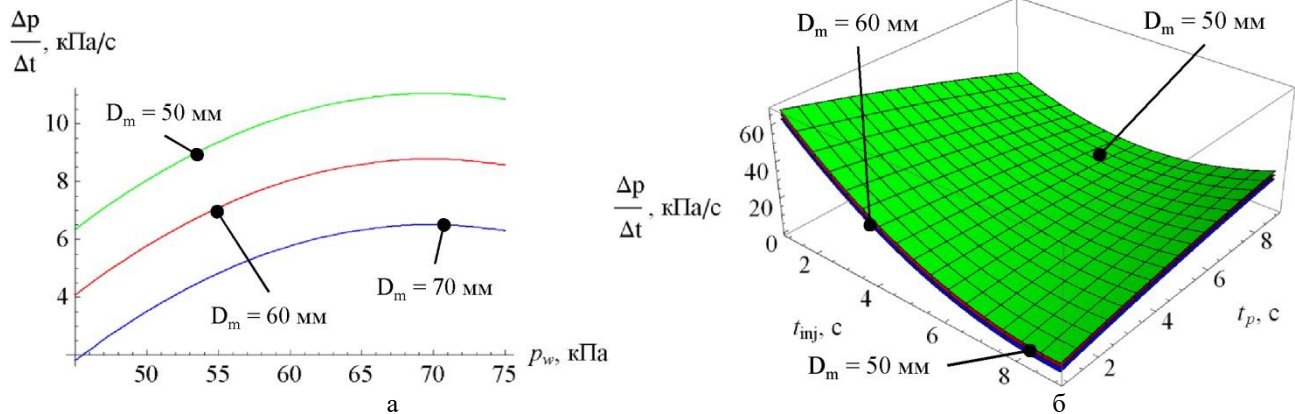


Рис. 5. Залежність значення швидкості зміни тиску $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ від різних значень його діаметру D_m від факторів досліджень: а – робочого вакуумметричного тиску p_w ; б – тривалості такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p

Аналіз рисунків 4–5 і залежностей (7)–(8) дає змогу стверджувати, що раціональні значення робочого вакуумметричного тиску $p_w=75$ кПа, тривалості такту вприскування повітряного інжектора $t_{inj}=6,22$ с і тривалості паузи повітряного інжектора $t_p=9,0$ с за умови мінімізації швидкості зміни тиску не залежать від діаметру молокопроводу.

У зв'язку з тим, що раціональні параметри (5) і (8) відрізняються, то необхідно вирішити компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації значення товщина шару молока на стінці молокопроводу і швидкості зміни тиску:

$$\begin{cases} h_m(D_m, p_w, t_{inj}, t_p) \rightarrow \min \\ \frac{\Delta p}{\Delta t}(D_m, p_w, t_{inj}, t_p) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (9)$$

Вирішуючи систему рівнянь (9) в програмному пакеті Wolfram Mathematica для різних значень діаметра молокопроводу, отримуємо відповідні раціональні параметри режимів роботи інжектора:

$$\text{при } D=50\text{мм} \rightarrow p_w=45,0\text{кПа}, t_{ij}=3,8\text{с}, t_p=2,9\text{с}, h_m=0,243\text{мм}, \frac{\Delta p}{\Delta t}=27,38\text{кПа/с};$$

$$\text{при } D=60\text{мм} \rightarrow p_w=57,5\text{кПа}, t_{ij}=3,6\text{с}, t_p=2,5\text{с}, h_m=0,306\text{мм}, \frac{\Delta p}{\Delta t}=35,32\text{кПа/с};$$

$$\text{при } D=70\text{мм} \rightarrow p_w=74,5\text{кПа}, t_{ij}=3,4\text{с}, t_p=2,1\text{с}, h_m=0,406\text{мм}, \frac{\Delta p}{\Delta t}=43,42\text{кПа/с}. \quad (10)$$

Обговорення отриманих результатів і порівняння з іншими методами. Проведені на основі системного підходу теоретичні й експериментальні дослідження, виробнича перевірка роботи розробленого інжектора, що застосовується для промивання молокопровідної лінії доїльної установки обговорювалися і були схваленими науковцями, викладачами агроінженерних спеціальностей, конструкторами та виробничниками під час проведення науково-практичних конференцій [13], семінарів, навчального процесу тощо. Зазначалося, що отримані результати є новими, відповідають високому рівню кращих світових досягнень у цій галузі, а їх опублікування викличе значний науково-практичний інтерес у вчених, педагогів і практиків. Результати отриманих експериментальних досліджень повністю підтверджують адекватність теоретичних передумов. У порівнянні з іншими методами чисельне моделювання і подальша обробка отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Mathematica забезпечили отримання достовірного об'єктивного результату, котрий очікувалося отримати відповідно до поставленої мети даних наукових досліджень.

Висновки. У результаті чисельного моделювання процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки із використанням інжектора в програмному пакеті STAR-CCM+ було встановлено залежності швидкості зміни тиску $\Delta P/\Delta t$ і зміни значення товщина шару молока на стінці молокопроводу h_m за різних значень його діаметру D_m від робочого вакуумметричного тиску p_w , тривалості такту вприскування повітряного інжектора t_{inj} і тривалості паузи повітряного інжектора t_p .

Вирішуючи компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації значення товщина шару молока на стінці молокопроводу і швидкості зміни тиску для різних значень діаметра молокопроводу отримано відповідні раціональні параметри режимів роботи інжектора: при $D = 50$ мм $\rightarrow p_w = 45,0$ 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 $\rightarrow p_w = 57,5$ 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 $\rightarrow p_w = 74,5$ кПа, $t_{inj} = 3,4$ с, $t_p = 2,1$ с, $h_m = 0,406$ мм, $\Delta P/\Delta t = 43,42$ кПа/с.

Список використаних джерел:

1. Палій, А. П. (2018). Обґрунтування, розробка та ефективність застосування інноваційних технологій і технічних рішень у молочному скотарстві. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра с.-г. наук. Миколаїв. 60 с.
2. Пришляк В. М., Бабин І. А. (2019). 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.
3. Фененко, А. І. (2008). Механізація доїння корів. Теорія і практика: Монографія. К. 198 с.
4. Пришляк В., Яропуд В. (2015) Экспериментальные исследования конструкционно-технологических параметров теплоизолятора / MOTROL: Commission of motorization and Energetics in Agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – Lublin–Rzeszów: Mot. and Energ. Rol., Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 2015. Vol. 17., No 3, P. 342-347.
5. Hunko I., Pryshliak V., Yaropud V., Branitskyi Y. (2017). Three-pipe concentric heat exchanger for sty / MOTROL: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – Lublin–Rzeszów: Mot. and Energ. Rol., Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol 19., No 3, P. 33-37.
6. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б. (2013). Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок / За редакцією доктора технічних наук, професора, член-кореспондента НААН України, І.А. Шевченка. Запоріжжя: Акцент Інвест-трейд. 156 с. ISBN 978-966-2602-41-VIII.
7. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry / INMATEH – Agricultural Engineering / National institute of research-development for machines and installations designed to agriculture and food industry. Bucharest / Rumania: INMA Bucharest, 2018. Vol 54, No.1, 95-104.; e: ISSN 2068 – 2239, p: ISSN 2068 – 4215.
8. Хмельовський, В. С., Павленко, С. І., Линник, Ю. О., Дудін, В. Ю., Алієв, Е. Б. (2017). Механіко-технологічні основи використання вакуумних насосів доїльних установок: монографія. К. : ЦП "Компринт". 177 с. ISBN 978-966-929-645-0.
9. Шумакова, Н. К. (2000). Молочная продуктивность, состав и свойства молока коров черно-пестрой породы при различных технологиях доения в зависимости от сезона года: автореф. дис. к. с.-г. наук: 06.02.04/ Шумакова Нина Корнеевна; Уральская государственная академия ветеринарной медицины. Троицк. 135 с.
10. Пришляк В. М. (2019). Вчення академіка П.М. Василенка у технологіях підготовки агроінженерів за умови інтеграції науки, освіти, виробництва / Збірник тез доповідей XX Міжн. наук. конф. "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17-19 жовтня 2019 року) ; МОН України, Миколаїв: МНАУ. 2019. С. 2–5.
11. Shevchenko, I., Aliev, E. (2013). Automated control systems for technical processes in dairy farming. Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering). № 61. С. 41–49. ISSN 1898-6730.
12. Алиев, Э. Б. (2011). Новый подход к техническому сервису доильных установок. Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». Минск. № 45. С. 271–277.
13. Бабин І. А. (2019). Моделювання режимів роботи системи промивання молокопроводів молочно-доїльного обладнання із повітряним інжектором / Збірник тез доповідей XX Міжн. наук. конф. "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17-19 жовтня 2019 року) // МОН України, Миколаїв: МНАУ. 2019. С. 2–5.

В. М. Пришляк, І. А. Бабин, І. В. Гунько. Моделирование режимов работы системы промывки молокопроводов молочно-доильного оборудования с воздушным инжектором

В результате численного моделирования процесса промывки молокопроводного оборудования установлены зависимости скорости изменения давления и изменения значения толщины слоя молока на стене молокопровода при различных значениях его диаметра от рабочего вакуумметрического давления, длительности такта впрыска воздушного инжектора и длительности паузы воздушного инжектора. Решая компромиссную задачу, которая сводится к минимизации значения толщины слоя молока на стене молокопровода и скорости изменения давления для различных значений диаметра молокопровода, получены соответствующие рациональные параметры режимов работы инжектора.

Ключевые слова: доильная установка, система промывки, моющий раствор, многофазных среду, численное моделирование.

V. Pryshliak, I. Babyn., I. Hunko. Modeling of the operating modes of the washing system for milk pipelines of milking equipment with an air injector

As a result of numerical simulation of the process of washing the milk line of the milking machine using the injector in the software package STAR-CCM + ,it was established the dependences of the rate of change of pressure and the change of the thickness of the layer of milk on the wall of the milk line at different values of its diameter from the working vacuum pressure, the duration of the injection stroke and the injection stroke the duration of the air injector pause. Solving the compromise problem, which reduces to minimizing the thickness of the milk layer on the wall of the milk pipeline and the rate of change of pressure for various values of the diameter of the milk pipeline, the corresponding rational parameters of the injector operating modes are obtained.

Keywords: milking unit, washing system, washing solution, multiphase medium, numerical simulation.