**Бабин І. А.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Babyn I.**

Ph.D., Associate Professor

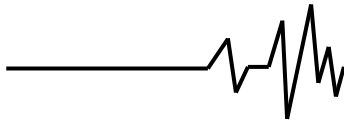
**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 637.115:621.647.7****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-6****ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ
ВІБРАЦІЇ ПЕРІОДИЧНО
ПРАЦЮЮЧОГО ІНЖЕКТОРА
СИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ
ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК**

У результаті аналізу техніко-технологічного забезпечення промивання доїльних установок встановлено, що найбільш ефективними є циркуляційні системи промивання із регульованим утворенням пробкового режиму з використанням повітряних інжекторів на базі автоматичного керування. Наслідками періодичною роботою інжектора є явище гідравлічного удару, що породжується раптовою зміною розподілу фаз потоку двофазного мийного розчину. Це й призводить до раптової зміни імпульсу двофазного мийного розчину, викликаючи хвилю тиску, що рухається системою. Ця хвиля тиску може призвести як до руйнування молочних відкладень на стінках молокопроводу, так і до можливого пошкодження елементів обладнання молокопровідної системи. Метою дослідження є підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок шляхом використання імпульсної вібрації періодично працюючого інжектора. У результаті чисельного моделювання процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки із використанням інжектора в програмному пакеті STAR-CCM+ було визначено динаміку зміни вакуумметричного тиску на відстані від інжектора ($p(0\text{ м})$, $p(1\text{ м})$, $p(2\text{ м})$, $p(3\text{ м})$, $p(4\text{ м})$, $p(5\text{ м})$) і динаміку зміни вмісту компонентів багатофазного середовища (мийний розчин a_f , повітря a_d , молоко a_m) для чотирьох варіантів: інжектор постійно закритий, інжектор постійно відкритий й інжектор періодично відкривається (1 с і 9 с) і закривається (1 с і 9 с). Встановлено, що застосування інжектора періодичної дії дозволяє зменшити вміст молока в молокопровідній лінії швидше і на більше значення, що свідчить про якісніший процес промивання. Доповнення фізико-математичного апарата явища гідравлічного удару для періодично працюючого інжектора повітря системи промивання дозволило встановити, що швидкість зміни тиску залежить від швидкостей і концентрацій фаз двофазного мийного розчину, тобто від його режиму течії, та швидкості розповсюдження ударної хвилі. Тому в якості критерію дії гідравлічного удару обрано швидкість зміни тиску $\Delta p/\Delta t$.

Ключові слова: доїльна установка, промивання, повітряний інжектор, моделювання, імпульс.

Постановка проблеми. Основною задачею молочного скотарства є збільшення виробництва молока і поліпшення його якості. Серед показників якості, як сировини для подальшої переробки, суттєвим є його бактеріальна забрудненість [1-2]. Даний показник залежить від санітарно-гігієнічного стану доїльного

обладнання, своєчасного охолодження молока, вимог та впливу інших зовнішніх чинників [3]. В процесі доїння молоко проходить через доїльні апарати, молокопровід, молокозбірники, індивідуальні та групові лічильники тощо, які є джерелом бактеріального забруднення [4]. Рекомендованими умовами покращення якості



молока є забезпечення ефективності процесу промивання доїльних установок шляхом збільшення його тривалості, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат (води, мийних засобів, електроенергії тощо) та собівартості молочної продукції [5].

Аналіз чинників і наслідків неефективного промивання доїльних установок показав, що утворення забруднень (молочних залишків, бруду, бактеріальних скупчень, інших частинок і речовин) на внутрішніх поверхнях молокопровідної системи доїльної установки в результаті неякісного виконання технологічної операції промивання призводить до збільшення бактеріального забруднення молока і як наслідок до зниження його ґатунку [6]. У разі недостатнього очищення і дезінфекції на поверхні молокопровідної лінії доїльної установки протягом короткого періоду часу (20–40 хв.) накопичуються молочні залишки, які є сприятливим середовищем для розвитку мікроорганізмів. Так, молочнокислі бактерії у подібних середовищах подвоюють свою чисельність у середньому за 40 хв., бактерії групи кишкової палички – за 20 хв. при 30°C [7], тобто в ідеальних умовах в період між доїнням (9 год. при дворазовому доїнні) чисельність мікрофлори зростає приблизно в 17 тис. разів. Бактерії, що залишаються після дезінфекції в кількості 2 % в середовищі ліпідно-протеїнових забруднень можуть відновити свою чисельність приблизно за 3,5 год. [8, 9].

Зміна бактеріального обсіменіння молока під час його переміщення забрудненою молокопровідною лінією доїльної установки на підставі усереднення даних Дегтярьова Г. П. [9], Березуцького В. І. [10], Котелевича В. А. [11], Цоя Ю. О. і Мамедової Р. А. [5] показав зростання бактеріального обсіменіння молока в міру просування його технологічною лінією: доїльні стакани (8-16 тис. CFU/cm³), колектор (34-47 тис. CFU/cm³), молочний шланг (74-85 тис. CFU/cm³), молокопровід (123-286 тис. CFU/cm³), молокозбірник (254-294 тис. CFU/cm³), молочний насос (до 320 тис. CFU/cm³).

Таким чином, створення автоматизованого техніко-технологічного забезпечення системи промивання доїльних установок, що інтенсифікує процес без додаткових витрат, набуває першочергового значення при вирішенні завдання підвищення якості молока.

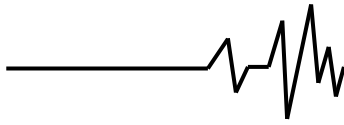
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Усі типи доїльних установок (доїльні установки, в яких доїння відбувається у відра або безпосередньо в бідони; доїльні установки, оснащені молокопроводами; доїльні установки з реєструвальним молокоміром) згідно з ISO 3918 [13], ISO 5707 [14], ISO 6690 [15] представляють собою складну гідравлічну мережу, яка містить у своєму складі кілька типів гідравлічних трактів, які відрізняються за своїми параметрами. До них

належать: молокопроводи, якими рухається потік молочно-повітряної суміші; вакуумпроводи з однофазним повітряним потоком; молокозбірники (або доїльні відра, бідони, реєструвальні молокоміри), де, завдяки значному обсягу внутрішнього простору, швидкість потоку наближається до нуля і відбувається розділення рідкої і газоподібної фаз (молока та повітря); доїльні апарати, в яких здійснюється пульсуючий режим течії як молока, так і повітря, що витрачається на створення пульсацій. Відповідно до стандарту ISO 5707 [14] конструкція доїльної установки так само повинна забезпечувати: очищення від залишків молока і відкладень на внутрішній поверхні молокопровідної лінії; очищення поверхонь і порожнин молокопровідної лінії від залишків мийних і дезінфікуючих засобів; зниження бактеріального обсіменіння поверхонь до допустимого рівня. Вузли та деталі комунікацій доїльної установки, які контактують з молоком, повинні бути виготовлені з матеріалів, призначених для цих цілей. Поверхня, відповідно до стандарту ISO 4288 [16], повинна мати шорсткість 2,5 мкм. Шорсткість поверхні зварних швів не повинна перевищувати 16 мкм. Повинно забезпечуватись повне стікання рідини з усіх частин молокопровідної лінії.

У результаті аналізу техніко-технологічного забезпечення промивання доїльних установок [17] встановлено, що найбільш ефективними є циркуляційні системи промивання із регульованим утворенням пробкового режиму з використанням повітряних інжекторів на базі автоматичного керування. Зазначений ресурсозберігаючий режим використаний фірмою DeLaval в автоматах промивки C100E, фірмою GEA Farm Technologies в автоматі промивки SineTherm та ін. [18, 19]. Також інжектування повітрям для ефективної циркуляційного промивання доїльної установки застосовується в автоматах MiniWash фірми PANAZOO і TOP WASH фірми InterPuls [20, 21]. Зокрема, фірма SAC пропонує системи промивання зі спонтанним утворенням рідких пробок, і не рекомендує використовувати пристрій повітряної пульсації Uni-Air-Pulse, вважаючи, що це не впливає на підвищення ефективності промивання доїльного обладнання [22]. Однак в режимі пробкового промивання збільшуються додаткові витрати повітря, що призводять до збільшення навантаження на вакуумні насоси і як наслідок збільшення енерговитрат.

Аналіз теоретичних і експериментальних передумов [23-25] техніко-технологічного забезпечення промивання доїльних установок показав, що процес руху двофазного мийного розчину при пробковому режимі течії, який утворюється під дією повітряних інжекторів, досліджено не достатньо.

Наслідками періодичною роботою інжектора є явище гідравлічного удару, що



породжується раптовою зміною розподілу фаз потоку двофазного мийного розчину. Це й призводить до раптової зміни імпульсу двофазного мийного розчину, викликаючи хвилю тиску, що рухається системою. Ця хвиля тиску може призвести як до руйнування молочних відкладень на стінках молокопроводу, так і до можливого пошкодження елементів обладнання молокопровідної системи [26, 27]. Процеси пошкодження і руйнування під впливом ударної хвилі залежить від великої кількості конструктивних особливостей самого обладнання (міцність матеріалу, геометричні розміри, наявність і якість зварних швів, пайки, місць з'єднання тощо) та ймовірності їх виникнення, тому комплексні дослідження вищезазначених процесів дуже важко провести як з теоретичної точки зору, так і з експериментальної. Однак у дослідженнях [28, 29] зазначено, що швидкість зміни тиску $\Delta p/\Delta t$ для зменшення ймовірності виникнення гідравлічного удару повинна бути мінімальною.

Тому необхідно більш детально дослідити процес промивання із використання повітряних інжекторів і визначити відповідні закономірності, на основі яких можна створити алгоритм роботи системи промивання молокопровідної лінії доїльних установок із автоматизованим контролем їх режимних параметрів.

Мета досліджень. Метою дослідження є

підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок шляхом використання імпульсної вібрації періодично працюючого інжектора.

Результати досліджень. Першим етапом досліджень є попереднє чисельне моделювання руху двофазного мийного розчину горизонтальною молокопровідною лінією доїльної установки. Схему чисельного досліду подано на рис. 1. Вихідними параметрами для чисельного моделювання є наступні. Молокопровідна лінія доїльної установки представляє собою прямолінійну горизонтальну трубу діаметром $D_m = 50$ мм і довжиною $L = 5$ м. З лівої сторони схеми зверху встановлений інжектор діаметром $D_m = 10$ мм. Сітку континуума молокопровідної лінії доїльної установки було сформовано на основі генератора поверхневої сітки і генератора багатограничних комірок. При цьому базовий розмір сітки становив 0,001 м.

Чисельне моделювання було проведено на основі таких фізичних моделей: багатофазна взаємодія, ізотермічне рівняння енергії рідини, поле сили тяжіння, $k-\epsilon$ модель турбулентності, усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, багатофазне рівняння стану, об'єм рідини (VOF), Ейлерова багатофазність [12].

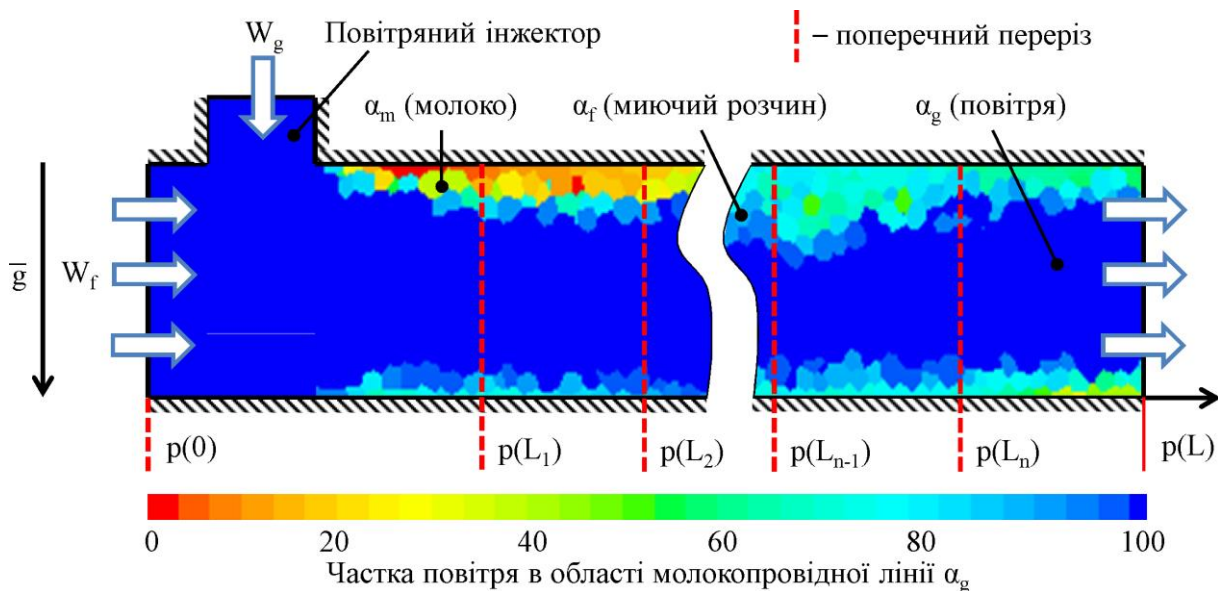
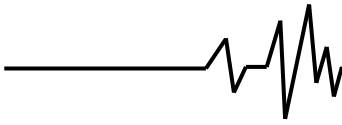


Рис. 1. Схема чисельного дослідження процесу руху багатофазного середовища горизонтальною молокопровідною лінією доїльної установки

У якості вихідних даних було прийнято, що мийний розчин в процесі руху мав постійну густину $\rho_f = 997,6$ кг/м³, динамічна в'язкість становила $\mu_f = 8,88 \cdot 10^{-4}$ Па·с. Молоко також у процесі руху мало постійну густину $\rho_m = 1027$ кг/м³, його динамічна в'язкість становила $\mu_m = 2,72 \cdot 10^{-3}$ Па·с. повітря підпорядковувалася рівнянням ідеального газу.

Динамічна в'язкість повітря становила $\mu_g = 1,85 \cdot 10^{-5}$ Па·с, молекулярна маса 28,9 кг/моль.

На початковий момент (початкові умови) було прийнято, що весь об'єм горизонтальної прямолінійної молокопровідної лінії був заповнений молоком, тобто $\alpha_m = 100$ %. При цьому вакуумметричний тиск становив $p = 45$ кПа. Далі на лівій межі було реалізовано масовий потік



повітря $W_g = 0,001$ кг/с, на правій – сталий вакуумметричний тиск $p(L) = 45$ кПа, а патрубок інжектора був повністю закритий (граничні умови).

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 межі було реалізовано масовий потік мийного розчину $W_f = 0,2$ кг/с.

Дослідження проводилися для чотирьох варіантів: інжектор постійно закритий, інжектор постійно відкритий й інжектор періодично відкривається (1 с і 9 с) і закривається (1 с і 9 с). Відкритий інжектор сполучає внутрішній об'єм молокопровідної лінії з атмосферним тиском і впускає повітря.

У процесі чисельного моделювання визначали динаміку вакуумметричного тиску в поперечних перерізах на відстані від лівої границі $p(0\text{ м})$, $p(1\text{ м})$, $p(2\text{ м})$, $p(3\text{ м})$, $p(4\text{ м})$, $p(5\text{ м})$ і динаміку вмісту компонентів багатофазного середовища: мийного розчину α_f , повітря α_g , молоко α_m (рис. 1).

Для першого варіанту, коли інжектор постійно закритий, було побудовано графік динаміки зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доільної установки, який показано на рис. 2.

На першому етапі (від 0 до 16 с), як зазначалося в методиці досліджень, відбувалося заміщення молока повітрям в об'ємі молокопровідної лінії. Далі значення вмісту молока і повітря стабілізувалося і становило відповідно $\alpha_m = 34,4\%$ і $\alpha_g = 65,6\%$. На другому етапі було реалізовано подачу мийного розчину, який заміщає повітря і молоко. На 31,3 с і далі значення вмісту молока становила $\alpha_m = 5,4\%$, що в результаті перерахунку відповідало середній товщині шару та краплин молока 0,68 мм, яке залишилося на стінках молокопровідної лінії [12].

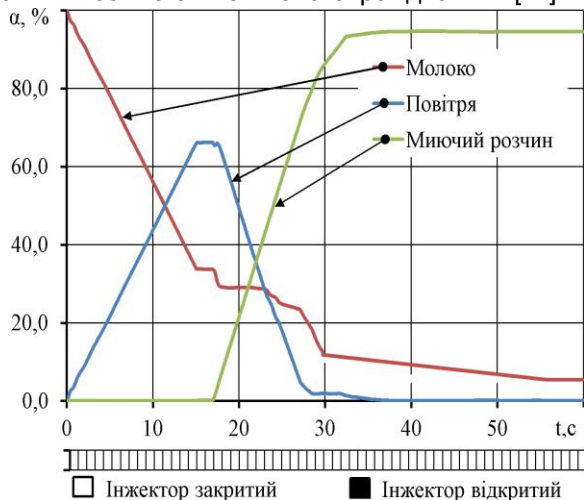


Рис. 2. Динаміка зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доільної установки при постійно закритому інжекторі

Динаміка зміни вакуумметричного тиску для першого варіанту, коли інжектор постійно закритий, показано на рис. 3. Як видно з рисунку вакуумметричний тиск практично незмінний для всіх ділянок молокопровідної лінії і становить 45 кПа.

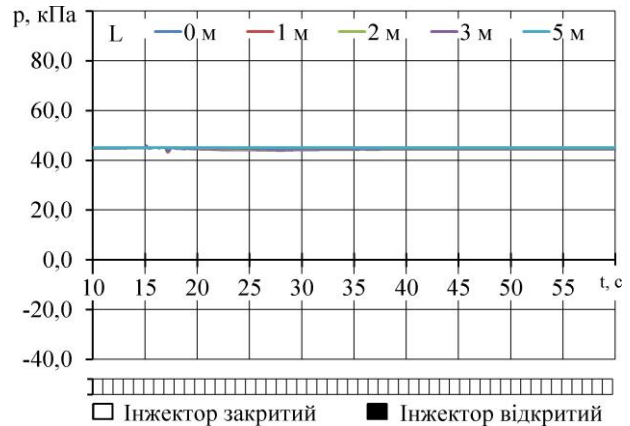


Рис. 3. Динаміка зміни вакуумметричного тиску в молокопровідній лінії доільної установки при постійно закритому інжекторі

Для другого варіанту, коли інжектор постійно відкритий, було побудовано графік динаміки зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доільної установки, який показано на рис. 4.

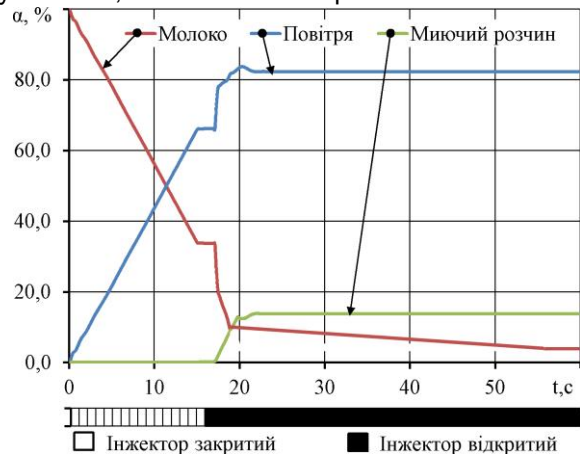
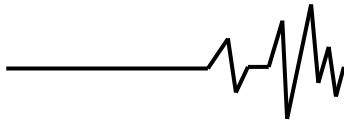


Рис. 4. Динаміка зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доільної установки при постійно відкритому інжекторі

Перший етап (від 0 до 16 с) відбувається аналогічно попередньому варіанту. На другому етапі було реалізовано подачу мийного розчину, який заміщає повітря і молоко. При цьому інжектор відкривається і залишається в такому стані протягом всього процесу в результаті чого через нього поступає атмосферне повітря. На 20,2 с і далі значення вмісту молока стабілізується і становить $\alpha_m = 3,9\%$. Оскільки причиною такого залишкового вмісту молока є його адгезія, то



перерахована його середня товщина шару на стінках молокопровідної лінії становить 0,49 мм. Товщина шару краплі, що утримується на стінках під дією адгезії, не повинно перевищувати 1,96 мм, тобто чисельне моделювання адекватно враховує явище адгезії.

Динаміка вакуумметричного тиску для другого варіанту, коли інжектор постійно відкритий, показано на рис. 5. Як видно з рисунку при відкритому інжекторі молокопровідна лінія сполучається з атмосферним тиском і вакуумметричний тиск по всіх ділянках спочатку зменшується до значення $-17,1$ кПа (що більше атмосферного), а потім виникають затухаючі коливання і через 5,2 с стабілізується на значенні 45 кПа [12]

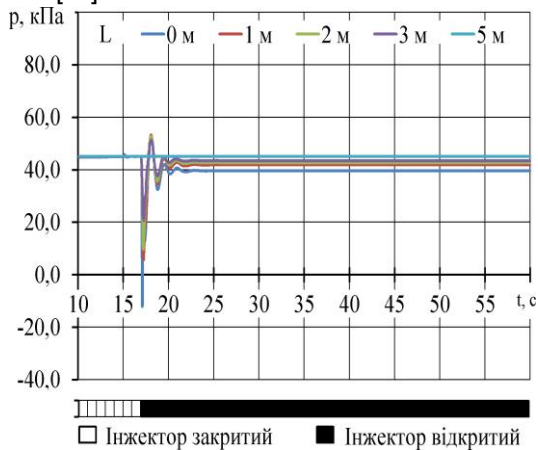


Рис. 5. Динаміка зміни вакуумметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки при постійно відкритому інжекторі

Для третього варіанту, коли інжектор періодично відкривається (1 с) і закривається (1 с), було побудовано графік динаміки вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доїльної установки, який показано на рис. 6.

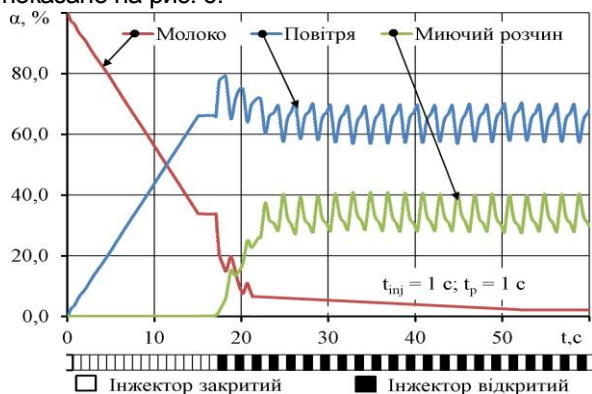


Рис. 6. Динаміка зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с

Перший етап (від 0 до 16 с) відбувається аналогічно попереднім варіантам. На другому етапі було реалізовано подачу мийного розчину, який заміщає повітря і молоко. При цьому інжектор протягом всього процесу періодично відкривається і закривається з інтервалами в 1 с. На 21,6 с і далі значення вмісту молока стабілізується і становить $\alpha_m = 2,1$ %. Це свідчить про залишок молока на стінках молокопровідної лінії із середньої товщиною шару 0,27 мм.

Динаміка зміни вакуумметричного тиску для третього варіанту, коли інжектор періодично відкривається (1 с) і закривається (1 с), представлено на рис. 7. Як видно з рисунку при кожному відкритті інжектора молокопровідна лінія сполучається з атмосферним тиском і вакуумметричний тиск по всіх ділянках спочатку зменшується до середнього значення $-39,7$ кПа (що більше атмосферного), а потім різко збільшується до середнього значення 91,2 кПа. Далі ці коливання вакуумметричного тиску повторюються. Аналіз рисунку дозволив зробити висновок про зменшення вакуумметричного тиску при віддаленні від інжектора [12].

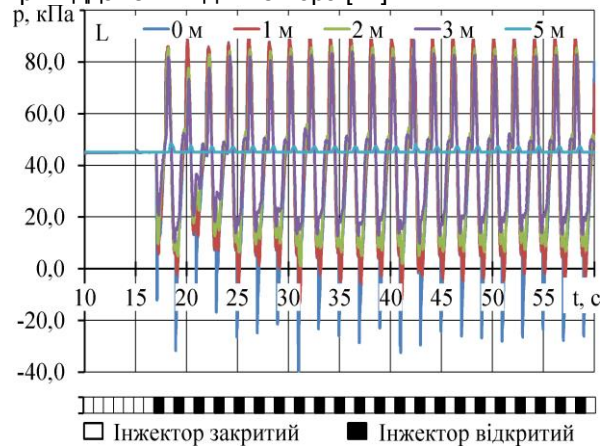


Рис. 7. Динаміка зміни вакуумметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с

На рис. 8 зображено графік максимального p_{max} і мінімального p_{min} вакуумметричного тиску залежно від відстані L до інжектора при $p_w = 45,0$ кПа, $t_{inj} = 1$ с, $t_p = 1$ с. Аналіз рисунку дає змогу стверджувати про затухання коливань вакуумметричного тиску при віддаленні від інжектора за експоненціальним законом (апроксимацію отриманих даних проведено в програмному пакеті Mathematica):

$$p_{max} = 46,1 \cdot e^{-0,264 L} + 45,0, \quad (1)$$

$$p_{min} = -80,3 \cdot e^{-0,245 L} + 45,0. \quad (2)$$

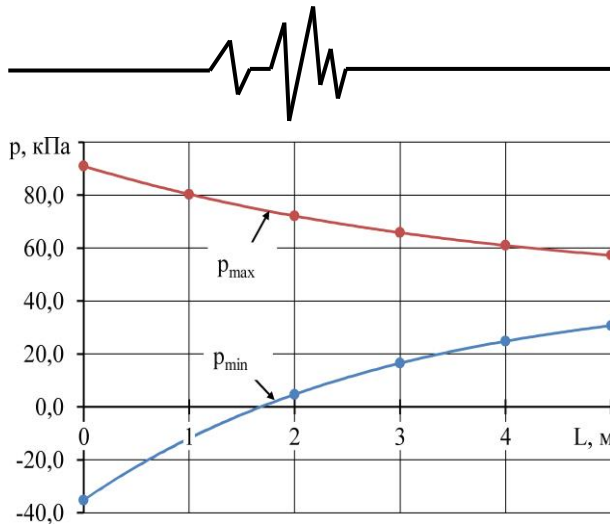


Рис. 8. Залежність максимального p_{\max} і мінімального p_{\min} вакуумметричного тиску від відстані L до інжектора для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с

Згідно з ISO 5707 і ISO 6690 допустимими коливання вакуумметричного тиску є 2,5 кПа, тому прирівнявши різницю рівнянь (1) і (2) до 2,5 кПа визначимо значення відстані до інжектора:

$$46,1 \cdot e^{-0,264 L} + 80,3 \cdot e^{-0,245 L} = 2,5 \rightarrow \quad (3)$$

$$L = 12,8 \text{ м.}$$

Тобто найменша відстань між інжекторами при $p_w = 45,0$ кПа, $t_{inj} = 1$ с, $t_p = 1$ с повинна становити $L = 12,8$ м.

Для четвертого варіанту, коли інжектор періодично відкривається (9 с) і закривається (9 с), було побудовано графік динаміки зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доїльної установки, який представлено на рис. 9.

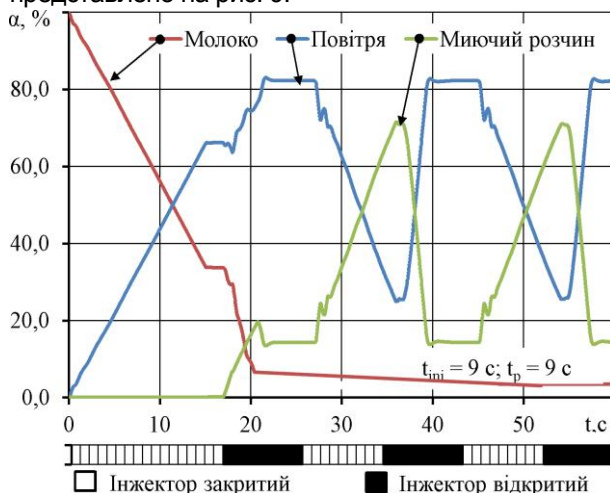


Рис. 9. Динаміка зміни вмісту компонентів багатофазного середовища в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 9 с

Перший етап (від 0 до 16 с) відбувається аналогічно попереднім варіантам. На другому етапі було реалізовано подачу мийного розчину, який заміщає повітря і молоко. При цьому інжектор

протягом всього моделювання періодично відкривається і закривається з інтервалами в 9 с. На 20,5 с і далі значення вмісту молока стабілізується і становить $\alpha_m = 3,5$ %. Це свідчить про залишок молока на стінках молокопровідної лінії із середньої товщиною шару 0,43 мм.

Динаміка вакуумметричного тиску для четвертого варіанту, коли інжектор періодично відкривається (9 с) і закривається (9 с), представлено на рис. 10. Як видно з рисунка при кожному відкритті інжектора молокопровідна лінія сполучається з атмосферним тиском і вакуумметричний тиск всіма ділянками спочатку зменшується до середнього значення $-137,1$ кПа (що більше атмосферного), а потім різко збільшується до середнього значення 72,2 кПа. Далі ці коливання вакуумметричного тиску повторюються. Затухання вакуумметричного тиску (до 5 % від середнього значення) відбувається за 5,2 с [12].

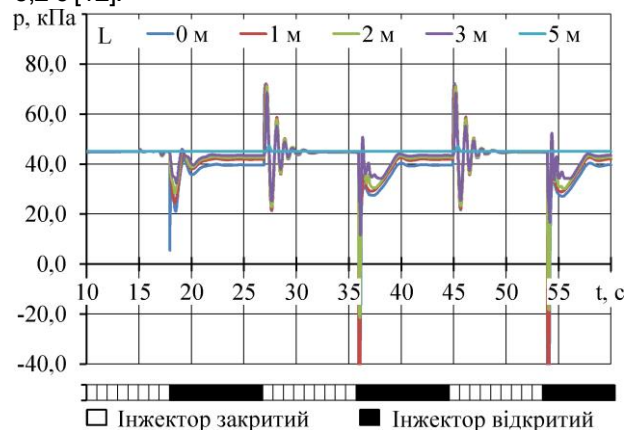


Рис. 10. Динаміка зміни вакуумметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 9 с

Аналіз рис. 10 дозволив зробити висновок про зменшення вакуумметричного тиску при віддаленні від інжектора.

На рис. 11 зображено графік максимального p_{\max} і мінімального p_{\min} вакуумметричного тиску залежно від відстані L до інжектора при $p_w = 45,0$ кПа, $t_{inj} = 9$ с, $t_p = 9$ с. Апроксимацію отриманих даних у програмному пакеті Mathematica дає змогу стверджувати про затухання коливань вакуумметричного тиску при віддаленні від інжектора за експоненціальним законом:

$$p_{\max} = 27,2 \cdot e^{-0,421 L} + 45,0, \quad (4)$$

$$p_{\min} = -145,9 \cdot e^{-0,321 L} + 45,0. \quad (5)$$

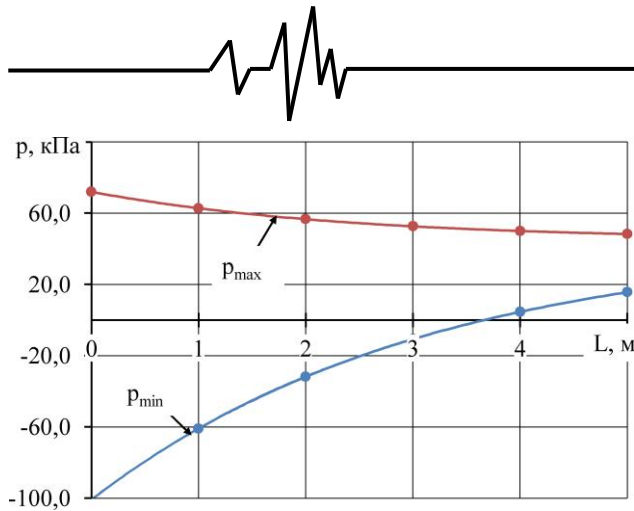


Рис. 11. Залежність максимального і мінімального вакуумметричного тиску від відстані до інжектора для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 9 с

Аналогічно попередньому варіанту, прирівнявши різницю рівнянь (4) і (5) до 2,5 кПа, визначимо значення відстані до інжектора:

$$27,2 \cdot e^{-0,421 L} + 145,9 \cdot e^{-0,321 L} = 2,5 \quad (6)$$

$$\rightarrow L = 12,7 \text{ м.}$$

Тобто найменша відстань між інжекторами при $p_w = 45,0$ кПа, $t_{inj} = 9$ с, $t_p = 9$ с повинна становити $L = 12,7$ м, що практично збігається із значенням для третього варіанту (відхилення – 0,2 м).

Згідно з вищезазначеними результатами можна стверджувати, що застосування інжектора періодичної дії дозволяє зменшити вміст молока в молокопроводній лінії швидше і на більше значення, що свідчить про якісший процес промивання.

Попереднє чисельне моделювання руху двофазного мийного розчину горизонтальною молокопроводною лінією доільної установки дали змогу визначити динаміку вакуумметричного тиску на відстані від інжектора. Динаміка змін вакуумметричного тиску для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається, представляється у вигляді затухаючих коливань у діапазоні від $-100,9$ кПа до $72,2$ кПа. Різка зміна тиску (0,1-0,6 с) спричиняє періодичні гідроудари, що чинять вплив на зменшення адгезії молока на поверхні молокопроводної лінії.

Другим етапом досліджень є доповнення фізико-математичного апарата явища гідравлічного удару для періодично працюючого інжектора повітря системи промивання.

Згідно з визначенням, гідравлічний удар (гідроудар) – стрибок тиску в будь-якій системі, що заповнена рідиною, викликаний швидкою зміною швидкості потоку цієї рідини. Може виникати внаслідок різкого закриття або відкриття засувки в системі, якою рухається рідина. У першому випадку гідроудар називають позитивним, у другому – негативним.

Розповсюдження ударної хвилі, що створюється миттєвим відкриттям і закриттям інжектора, в горизонтальній

молокопроводній лінії, проілюстрована на графіках зміни швидкості двофазного мийного розчину (рис. 12–13).

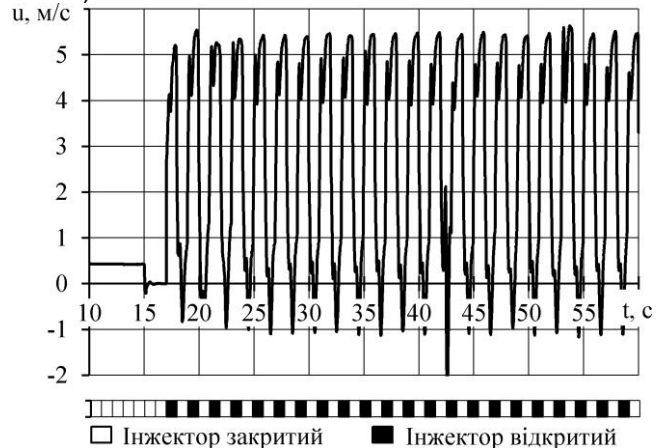


Рис. 12. Динаміка зміни швидкості двофазного мийного розчину в молокопроводній лінії доільної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с

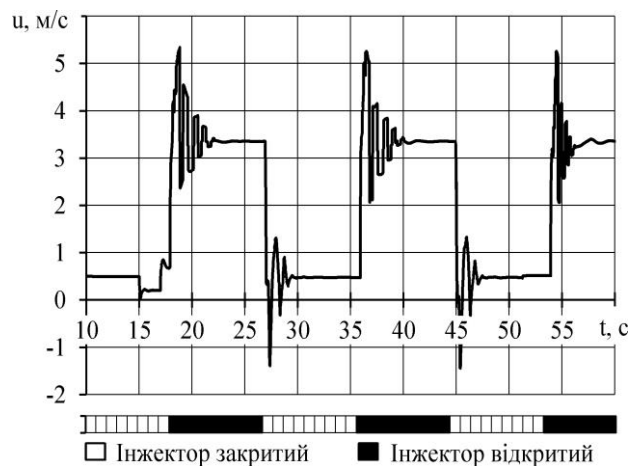


Рис. 13. Динаміка зміни швидкості двофазного мийного розчину в молокопроводній лінії доільної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 9 с

Після відкриття повітряного інжектора молокопроводна система сполучається із атмосферним тиском навколишнього середовища, зменшуючи вакуумметричний тиск, який перетинає відмітку 0 кПа і переходить в манометричний (надлишковий) тиск (рис. 14-15). При цьому швидкість мийного розчину різко збільшується до значення 5,2 м/с за 0,34 с. Далі тиск стабілізується на початковому значенні, а швидкість руху мийного розчину, виконуючи затухаючі коливання, зменшується до значення 3,3 м/с. Це свідчить про створення позитивної ударної хвилі, яка рухається за напрямком руху мийного розчину.

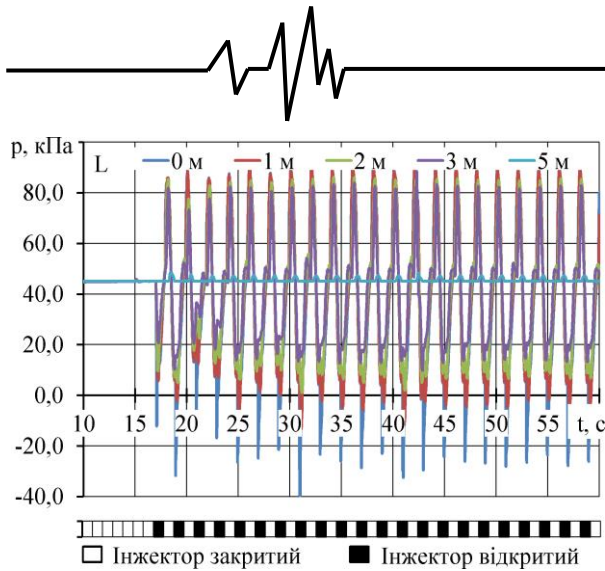


Рис. 14. Динаміка зміни вакууметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 1 с

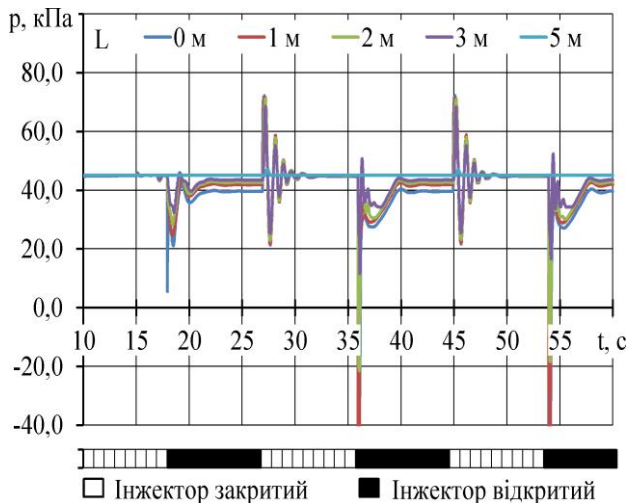


Рис. 15. Динаміка зміни вакууметричного тиску в молокопровідній лінії доїльної установки для варіантів, коли інжектор періодично відкривається і закривається з інтервалами 9 с

Після закриття повітряного інжектора вакууметричний тиск різко збільшується і починає коливатися, затухаючи до початкового значення (рис. 14-15). Швидкість миючого розчину при цьому зменшується до 0 і далі змінює свій знак на протилежний ($-1,3$ м/с), що свідчить про зворотній рух миючого розчину. Далі знову збільшується в прямому напрямку руху, після чого динаміка зміни швидкості має вигляд затухаючих з часом коливань. Це

призводить до утворення негативної ударної хвилі, яка переміщається вздовж молокопровідної лінії проти напрямку руху миючого розчину.

Згідно з [30-31] ударна хвиля рухається зі швидкістю, яку можна обчислити за рівнянням

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho}}{1 + \frac{D_m E}{h_m E_m} j}} \quad (7)$$

де ρ – густина фази, кг/м³;
 D_m – діаметр труби, м;
 h_m – товщина стінки труби, м;
 E_m – модуль пружності матеріалу стінки труби, Н/м²;

E – модуль пружності фази, Н/м²;

j – емпіричний коефіцієнт, який залежить від кріплення труби.

Для закріпленої труби, яка чинить опір поздовжньому рухові, j обчислюється за допомогою рівняння [32]:

$$j = \begin{cases} \frac{2h_m(1+\nu) + \frac{D_m(1-\nu^2)}{D_m + h_m}}{D_m}, & \text{якщо } \frac{D_m}{h_m} < 25, \\ 1 - \nu^2, & \text{якщо } \frac{D_m}{h_m} > 25, \end{cases} \quad (8)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона рідкої фази двофазного миючого розчину.

Зв'язок між підвищенням тиску і зміною швидкості руху миючого розчину можна описати рівнянням Жуковського [33]:

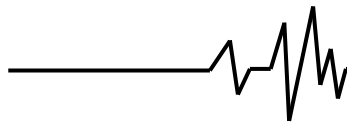
$$\Delta p = \rho a \Delta u \quad (9)$$

де Δp – підвищення тиску, Па;

Δu – зміна швидкості фази від стаціонарного стану, м/с.

Рівняння Жуковського передбачає, що зміна швидкості відбувається миттєво, що призводить до збільшення тиску.

Нестационарна система рівнянь законів збереження маси й імпульсу в скалярній формі з урахуванням розповсюдження ударної хвилі вздовж однієї координати має вигляд:



$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\alpha \rho_g} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{u_g}{\alpha \rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} + a_g^2 \frac{\partial u_g}{\partial x} &= 0, \\ \frac{1}{(1-\alpha)\rho_1} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{u_1}{(1-\alpha)\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + a_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x} &= 0, \\ \frac{1}{\alpha \rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{4p_w}{\alpha \rho_g D_m} + g \sin \theta &= 0, \\ \frac{1}{(1-\alpha)\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{4p_w}{(1-\alpha)\rho_1 D_m} + g \sin \theta &= 0, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

де p_w – робочий вакуумметричний тиск, Па.

Для розв'язання системи рівнянь (10) додаємо до першого рівняння добуток третього

рівняння і константи λ_g . Аналогічно додаємо до другого рівняння добуток четвертого рівняння і константи λ_1 . У результаті отримуємо

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + u_g \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \rho_g a_g^2 \frac{\partial u_g}{\partial x} + \\ + \lambda_g \left(\frac{1}{\alpha \rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{4p_w}{\alpha \rho_g D_m} + g \sin \theta \right) &= 0, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u_1 \frac{\partial p}{\partial x} + (1-\alpha)\rho_1 a_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \\ + \lambda_1 \left(\frac{1}{(1-\alpha)\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{4p_w}{(1-\alpha)\rho_1 D_m} + g \sin \theta \right) &= 0. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

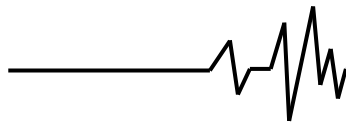
За результатом перегрупування доданків кожного з рівнянь системи (11) маємо

$$\left\{ \begin{aligned} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \left(u_g + \frac{\lambda_g}{\alpha \rho_g} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \lambda_g \left[\frac{\partial u_g}{\partial t} + \left(u_g + \frac{\alpha \rho_g a_g^2}{\lambda_g} \right) \frac{\partial u_g}{\partial x} \right] + \lambda_g C_g &= 0, \\ \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \left(u_1 + \frac{\lambda_1}{(1-\alpha)\rho_1} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \lambda_1 \left[\frac{\partial u_1}{\partial t} + \left(u_1 + \frac{(1-\alpha)\rho_1 a_1^2}{\lambda_1} \right) \frac{\partial u_1}{\partial x} \right] + \lambda_1 C_1 &= 0, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де $C_g = \frac{4p_w}{\alpha \rho_g D_m} + g \sin \theta$, $C_1 = \frac{4p_w}{(1-\alpha)\rho_1 D_m} + g \sin \theta$

– введені константи.

Рішення системи диференціальних рівнянь в часткових похідних (12) зводиться до рішення наступних рівнянь



$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \lambda_g \frac{\partial u_g}{\partial t} + \lambda_g C_g = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} + \lambda_1 C_1 = 0, \\ \frac{\partial X_g}{\partial t} = u_g + \frac{\lambda_g}{\alpha \rho_g} = u_g + \frac{\alpha \rho_g a_g^2}{\lambda_g}, \\ \frac{\partial X_1}{\partial t} = u_1 + \frac{\lambda_1}{(1-\alpha)\rho_1} = u_1 + \frac{(1-\alpha)\rho_1 a_1^2}{\lambda_1}. \end{cases} \quad (13)$$

У результаті інтегрування рівнянь (13) отримуємо

$$\begin{cases} \Delta p_g + \lambda_g \Delta u_g + \lambda_g C_g \Delta t = 0, \\ \Delta p_1 + \lambda_1 \Delta u_1 + \lambda_1 C_1 \Delta t = 0, \\ \lambda_g = \pm \alpha \rho_g a_g, \\ \lambda_1 = \pm (1-\alpha) \rho_1 a_1. \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_1 = \pm \alpha \rho_g a_g (\Delta u_g + C_g \Delta t) \pm (1-\alpha) \rho_1 a_1 (\Delta u_1 + C_1 \Delta t). \quad (15)$$

Поділивши ліву і праву частину (15) на Δt , отримуємо швидкість зміни тиску:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\Delta t} &= \pm \alpha \rho_g a_g \frac{\Delta u_g}{\Delta t} \pm (1-\alpha) \rho_1 a_1 \frac{\Delta u_1}{\Delta t} \pm \\ &\pm \frac{4p_w (a_g + a_1)}{D_m} \pm (\alpha \rho_g a_g + (1-\alpha) \rho_1 a_1) g \sin \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Відповідно до (16) швидкість зміни тиску залежить від швидкостей і концентрацій фаз двофазного мийного розчину, тобто від його режиму течії та швидкості розповсюдження ударної хвилі. У подальших дослідженнях і будемо використовувати в якості критерію гідравлічного удару швидкість зміни тиску $\Delta p/\Delta t$ [12].

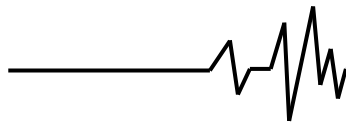
Висновки. У результаті чисельного моделювання процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки із використанням інжектора в програмному пакеті STAR-CCM+ було визначено динаміку зміни вакуумметричного тиску на відстані від інжектора ($p(0\text{ м})$, $p(1\text{ м})$, $p(2\text{ м})$, $p(3\text{ м})$, $p(4\text{ м})$, $p(5\text{ м})$) і динаміку зміни вмісту компонентів багатофазного середовища (мийний розчин α_f , повітря α_g , молоко α_m) для чотирьох варіантів: інжектор постійно закритий, інжектор постійно відкритий й інжектор періодично відкривається (1 с і 9 с) і закривається (1 с і 9 с). Встановлено, що застосування інжектора періодичної дії дозволяє зменшити вміст молока в молокопровідній лінії швидше і на більше значення, що свідчить про якісніший процес промивання.

У результаті сумарна зміна тиску з урахуванням розповсюдження ударної хвилі вздовж молокопровідної лінії доїльної установки можна розрахувати за рівняннями

Доповнення фізико-математичного апарата явища гідравлічного удару для періодично працюючого інжектора повітря системи промивання дозволило встановити, що швидкість зміни тиску залежить від швидкостей і концентрацій фаз двофазного мийного розчину, тобто від його режиму течії, та швидкості розповсюдження ударної хвилі. Тому в якості критерію дії гідравлічного удару обрано швидкість зміни тиску $\Delta p/\Delta t$.

Список використаних джерел

1. Шевченко І.А., Алієв Е.Б. Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок, Запоріжжя: Акцент Інвест-трейд, 2013, 156 с, ISBN 978-966-2602-41-VIII.
2. Shevchenko I., Aliev E. Automated control systems for technical processes in dairy farming, Annals of Warsaw University of Sciences, SGGW, Agriculture (Agricultural and Forest Engineering), 2013, № 61, С. 41–49, ISSN 1898-6730.
3. Адамчук В. В., Фененко А. И., Дмитрив В. Т. Механизация и автоматизация производства молока: монографія, Нежин: Издатель ЧП Лисенко Н.М., 2013, 324 с.
4. Палій А. П. Встановлення чинників, які впливають на процес промивання молокопроводу. Вісник Полтавської державної аграрної академії, Полтава, 2015, № 1–2, С. 80–83.
5. Coj J. A., Mamedova R. A. 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, 2005, P. 355–359.

6. Палій А. П. Дослідження процесу промивання доїльних установок. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, Львів, Т. 16, № 2 (59), Ч. 3, 2014, С. 156–161.

7. Shkromada O., Skliar O., Paliy A., Ulko L., Gerun I., Naumenko O., Ishchenko K., Kysterna O., Musiienko O., Paliy A., Development of measures to improve milk quality and safety during production // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, Vol. 3/11 (99), P. 30–39, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168762>.

8. Paliy A., Naumenko A., Paliy A., Zolotaryova S., Zolotarev A., Tarasenko L., Nechyporenko O., Ulko L., Kalashnyk O., Musiienko Y. Identifying changes in the milking rubber of milking machines during testing and under industrial conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5/1 (107), 2020, P. 127–137, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212772>.

9. Дегтерев Г. П. Качество молока в зависимости от санитарного состояния доильного оборудования, Молочная промышленность, № 5, 2000, С. 23–26.

10. Березуцкий В. И. Совершенствование технологии циркуляционной мойки молокопровода доильной установки УДС-ЗА, Дис. ... канд. техн. наук, зерноград, 2000, 158 с.

11. Котелевич В. А., Згозінська О. А. Ветеринарно-санітарна оцінка молока, отриманого від корів у Дослідному господарстві «Городецьке», Володимирецького району, Рівненської області, Науково-технічний бюлетень НДЦ біобезпеки та екологічного контролю ресурсів АПК, Т. 2. № 3, 2014, С.106–110.

12. Бабин І.А. Підвищення ефективності роботи системи промивання доїльних установок. Дис. ... кан. тех. наук : 6.08.20. Він. нац. аграр. ун-т. Вінниця, 2020. 235с.

13. ISO 3918, Milking machine installations – Vocabulary, Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007, 42 p.

14. ISO 5707, Milking machine installations – Construction and performance, Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007, 52 p.

15. ISO 6690, Milking machine installations – Mechanical tests, Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007, 46 p.

16. ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface

texture, Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 1996, 11 p.

17. Луценко М., Зволейко Д. Дослідження процесу доїння корів у спеціалізованих доїльних залах, Техніка і технології АПК, 2012, № 9 (36), С. 31–34.

18. Инструкция по эксплуатации и монтажу автомата промывки SineTherm, Инструкция фирмы GEA Farm Technologies, 2010, 210 с.

19. Системная книга фирмы De Laval: Автомат промывки С100Е, 2003, 95 с.

20. Руководство по эксплуатации автомата промывки Е.М.В., Инструкция фирмы PANAZOO, 2005, 25 с.

21. Инструкция по эксплуатации автомата промывки TOP WASH, Инструкция фирмы InterPuls, 2008, 22 с.

22. Руководство по установке и обслуживанию автомата промывки UNIWASH2, Инструкция фирмы SAC, 2003, 90 с.

23. Палій А. П. Обґрунтування, розробка та ефективність застосування інноваційних технологій і технічних рішень у молочному скотарстві: Дис. ... докт. с.-г. наук, Миколаїв, 2018, 382 с.

24. 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, Rochester New York, 1995, Nov. 29, dec. 1.

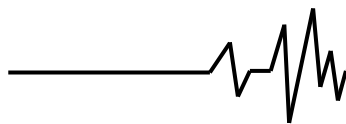
25. Dmytriv V. Dynamic characteristics of hydropneumatic milking systems. Zbornik radova: proceedings, Opatija, Croatia. February 13–16, 2007, P. 332-335.

26. Okoye Obuora A., Evaluation Of Two Phase Flow Characteristics In A Pipeline: Homogenous Model Approach, International Journal of Scientific & Technology Research, Issue 7, 2016, P. 319-326.

27. Boran Zhang, Wuyi Wan, Mengshan Shi, Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment, Water, 10 (7), 2018, 928. <https://doi.org/10.3390/w10070928>.

28. Алієв Е. Б. Оцінка фактичного рівня безвідмовності вузлів вакуумної системи молочно-доїльного обладнання. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2012, Вип. 120, С. 326–330.

29. Шевченко І. А., Алієв Е. Б., Дриго В. О., Потеруха Б. Т. Підвищення якості технічного обслуговування молочно-доїльного обладнання. Техніка і технології АПК. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2012, № 12 (39), С. 37–40.



30. 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.

31. Charles Demay. Modelling and simulation of transient air-water two-phase flows in hydraulic pipes. Thèse pour obtenir le grade de. Docteur de L'université Grenoble Alpes. 2017. 171 p.

32. Ali Ersin Dinçer. Investigation of waterhammer problems in the penstocks of pumped-storage power plants. A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university. 2013. 84 p.

33. Jensen, Rune Kjerrumgaard, Larsen, Jesper, Lassen, Kasper Lindgren. Modelling of a Two Phase Water Hammer. Master's Thesis. Aalborg University Esbjerg. 2018. 149 p.

References

1. 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]. Zaporozhye: Accent Invest-trade [in Ukrainian].

2. 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, 41–49.

3. Adamchuk, V.V., Fenenko, A.I., Dmitriv, V.T. (2013). Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva moloka: monografiya [Mechanization and automation of milk production: monograph]. Nezhin: Publisher PE Lisenko N.M.

4. Paliy A.P. (2015). Vstanovlennya chynnykiv, yaki vplyvayut' na protses promyvannya molokoprovodu [Establishment of the factors influencing process of washing of a milk pipeline]. Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy, Poltava, 1–2, 80–83 [in Ukrainian].

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 zwierzeczej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE, Warszawa, 355–359.

6. Paliy A.P. (2014). Doslidzhennya protsesu promyvannya doyl'nykh ustanovok [Research of process of washing of milking installations]. Scientific Bulletin of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology. SZ Gzhytskoho, Lviv, 16, 2 (59), 3, 156–161 [in Ukrainian].

7. Shkromada, O., Skliar, O., Paliy, A., Ulko, L., Gerun, I., Naumenko, O., Ishchenko, K., Kysterna, O., Musiienko, O., Paliy, A. (2019).

Development of measures to improve milk quality and safety during production. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/11 (99), 30–39, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168762>.

8. Paliy, A., Naumenko, A., Paliy, A., Zolotaryova, S., Zolotarev, A., Tarasenko, L., Nechyporenko, O., Ulko, L., Kalashnyk, O., Musiienko, Y. (2020). Identifying changes in the milking rubber of milking machines during testing and under industrial conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/1 (107), 127–137, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212772>.

9. Degterev, G. P. (2000). Kachestvo moloka v zavisimosti ot sanitarnogo sostoyaniya doil'nogo oborudovaniya [Milk quality depending on the sanitary condition of milking equipment]. Dairy Industry, 5, 23–26 [in Russian].

10. Berezutskiy V.I. (2000). Sovershenstvovaniye tekhnologii tsirkulyatsionnoy moyki molokoprovoda doil'noy ustanovki UDS-3A [Improvement of the technology of circulation cleaning of the milk line of the milking installation UDS-3A]. Dis. ... Cand. tech. nauk, Zernograd [in Russian].

11. Kotelevych, V.A., Zgozinska, O.A. (2014). Veterynarno-sanitarna otsinka moloka, otrymanoho vid koriv u Doslidnomu hospodarstvi «Horodets'ke», Volodymyrets'koho rayonu, Rivnens'koyi oblasti [Veterinary and sanitary assessment of milk obtained from cows in the Experimental Farm "Gorodetske", Volodymyrets district, Rivne region]. Scientific and Technical Bulletin of the Research Center for Biosafety and Environmental Control of Agricultural Resources, 2 (3), 106–110 [in Ukrainian].

12. Babin, I.A. (2020). Pidvyshchennya efektyvnosti roboty systemy promyvannya doyl'nykh ustanovok [Improving the efficiency of the milking system flushing system]. Dis. ... Can. those. Science: 6.08.20. He. nat. agrarian. un-t. Vinnytsia [in Ukrainian].

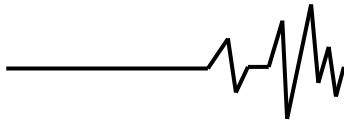
13. ISO 3918 (2007). Milking machine installations – Vocabulary. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization.

14. ISO 5707 (2007). Milking machine installations – Construction and performance. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization.

15. ISO 6690 (2007). Milking machine installations – Mechanical tests. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization.

16. ISO 4288 (1996). Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization.

17. Lutsenko, M., Zvoleyko, D. (2012). Doslidzhennya protsesu doynnya koriv u spetsializovanykh doyl'nykh zalakh [Research of the process of milking cows in specialized milking parlors].



Techniques and technologies of agro-industrial complex, 9 (36), 31–34 [in Ukrainian].

18. Instruction for use and installation of the SineTherm washer, Instruction of GEA Farm Technologies (2010) [in Russian].

19. System book of the De Laval company: Automatic washing machine C100E (2003) [in Russian].

20. Operating manual for the E.M.W.washer, PANAZOO manual (2005) [in Russian].

21. Operating instructions for the TOP WASH machine, InterPuls manual (2008) [in Russian].

22. Manual for the installation and maintenance of the UNIWASH2 washing machine, SAC company manual (2003) [in Russian].

23. Paliy A.P. (2018). Obgruntuvannya, rozrobka ta efektyvnist' zastosuvannya innovatsiynnykh tekhnolohiy i tekhnichnykh rishen' u molochnomu skotarstvi [Substantiation, development and efficiency of application of innovative technologies and technical decisions in dairy cattle-breeding] Dis. ... Dr. s.-g. Sciences, Mykolaiv [in Ukrainian].

24. 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, Rochester New York, Nov. 29, dec. I.

25. Dmytriv, V. (2007). Dynamic characteristics of hydropneumatic milking systems. Zbornik radova: proceedings, Opatija, Croatia. February 13–16, 332-335.

26. Okoye, Obuora A. (2016). Evaluation Of Two Phase Flow Characteristics In A Pipeline: Homogenous Model Approach. International Journal of Scientific & Technology Research, 7, 319-326.

27. Boran Zhang, Wuyi Wan, Mengshan Shi. (2018). Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment, Water, 10 (7), 928. <https://doi.org/10.3390/w10070928>.

28. Aliiev, E.B. (2012). Otsinka faktychnoho rinvnya bezvidmovnosti vuzliv vakuumnoyi systemy molochno-doyil'noho obladnannya [Estimation of the actual level of failure of units of vacuum system of dairy-milking equipment]. Modern problems of improvement of technical systems and technologies in animal husbandry: Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko, Kharkiv, 120, 326–330 [in Ukrainian].

29. Shevchenko, I.A., Aliiev, E.B., Drygo, V.O., Poterukha, B.T. (2012). Pidvyshchennya yakosti tekhnichnoho obsluhovuvannya molochno-doyil'noho obladnannya [Improving the quality of maintenance of milking equipment. Machinery and technologies of agro-industrial complex]. UkrNDIPVT them. L. Pogoriloho, 12 (39), 37–40 [in Ukrainian].

30. Sabin-Cristian Ceuca. (2015). Computational Simulations of Direct Contact

Condensation as the Driving Force for Water Hammer. Genehmigten Dissertation. Technische Universität München Lehrstuhl Für Nukleartechnik.

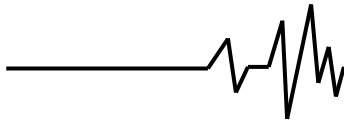
31. Charles Demay. (2017). Modelling and simulation of transient air-water two-phase flows in hydraulic pipes. Thèse pour obtenir le grade de. Docteur de L'université Grenoble Alpes.

32. Ali Ersin Dinçer. (2013). Investigation of waterhammer problems in the penstocks of pumped-storage power plants. A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university.

33. Jensen, Rune Kjerrumgaard, Larsen, Jesper, Lassen, Kasper Lindgren. (2018). Modelling of a Two Phase Water Hammer. Master's Thesis. Aalborg University Esbjerg.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВИБРАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИ РАБОТАЮЩЕГО ИНЖЕКТОРА СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В результате анализа технико-технологического обеспечения промывки доильных установок установлено, что наиболее эффективны циркуляционные системы промывки с регулируемым образованием пробкового режима с использованием воздушных инжекторов на базе автоматического управления. Последствиями периодической работой инжектора является явление гидравлического удара, порождаемое внезапным изменением распределения фаз потока двухфазного моющего раствора. Это и приводит к внезапному изменению импульса двухфазного моющего раствора. Эта волна давления может привести к разрушению молочных отложений на стенках молокопровода, так и к возможному повреждению элементов оборудования молокопроводной системы. Целью исследования является повышение эффективности работы системы промывки доильных установок путем использования импульсной вибрации периодически работающего инжектора. В результате численного моделирования процесса промывки молокопроводной линии доильной установки с использованием инжектора в программном пакете STAR-CCM+ была определена динамика изменения вакуумметрического давления на расстоянии от инжектора ($r(0\text{ м})$, $r(1\text{ м})$, $r(2\text{ м})$, $r(3\text{ м})$, $r(4\text{ м})$, $r(5\text{ м})$) и динамику изменения содержания компонентов многофазной среды (моющий раствор α_f , воздух α_g , молоко α_m) для четырех вариантов: инжектор постоянно закрыт, инжектор постоянно открыт и инжектор периодически открывается (1 с и 9 с) и закрывается (1 с и 9 с). Установлено, что применение инжектора периодического



действия позволяет уменьшить содержание молока в молокопроводной линии быстрее и на большее значение, что свидетельствует о более качественном процессе промывания. Дополнение физико-математического аппарата явления гидравлического удара для периодически работающего воздушного инжектора системы промывки позволило установить, что скорость изменения давления зависит от скоростей и концентраций фаз двухфазного моющего раствора, то есть от его режима течения и скорости распространения ударной волны. Поэтому в качестве критерия действия гидравлического удара выбрана скорость изменения давления $p/\Delta t$.

Ключевые слова: доильная установка, промывка, воздушный инжектор, моделирование, импульс.

INVESTIGATION OF PULSE VIBRATION OF THE PERIODICALLY WORKING INJECTOR OF THE MILKING WASHING SYSTEM

As a result of the analysis of technical and technological support of washing of milking installations it is established that the most effective are circulating systems of washing with regulated formation of a stopper mode with use of air injectors on the basis of automatic control. The consequences of periodic operation of the injector is the phenomenon of hydraulic shock, which is caused by a sudden change in the phase distribution of the flow of two-phase washing solution. This leads to a sudden change in the momentum of the two-phase washing

solution, causing a pressure wave moving through the system. This pressure wave can lead to the destruction of milk deposits on the walls of the milk line, as well as to possible damage to the equipment of the milk system. The aim of the study is to increase the efficiency of the milking system flushing system by using pulsed vibration of a periodically operating injector. As a result of numerical simulation of the process of washing the milk line of the milking parlor using an injector in the software package STAR-CCM + was determined by the dynamics of changes in vacuum pressure at a distance from the injector (p (0 m), p (1 m), p (2 m), p (3 m), p (4 m), p (5 m)) and the dynamics of changes in the content of components of the multiphase medium (washing solution α_i , air α_g , milk α_m) for four options: the injector is constantly closed, the injector is constantly open and the injector is periodically opened (1 s and 9 s) and closes (1 s and 9 s). It is established that the use of a periodic injector allows to reduce the milk content in the milk line faster and by a larger value, which indicates a better washing process. The addition of the physical-mathematical apparatus of the hydraulic shock phenomenon for a periodically operating air injector of the flushing system allowed to establish that the rate of pressure change depends on the velocities and concentrations of phases of two-phase washing solution, ie its flow regime and shock wave propagation velocity. Therefore, the rate of pressure change $\Delta p / \Delta t$ is chosen as a criterion for the action of hydraulic shock.

Key words: milking installation, washing, air injector, modeling, impulse.

Відомості про авторів

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).

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).

Babyn Ihor - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com).