**I. МАШИНОВИКОРИСТАННЯ У РОСЛИННИЦТВІ ТА ТВАРИННИЦТВІ**

УДК 637.116

DOI: 10.37128/2520-6168-2019-1-1

**ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ РУХУ ДВОФАЗНОГО МІЮЧОГО РОЗЧИНУ ПО МОЛОКОПРОВІДНІЙ ЛІНІЇ****Бабин Ігор Анатолійович**, асистент  
Вінницький національний аграрний університет**I. Babyn**, Assistant  
Vinnytsia National Agrarian University

*Аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень показав, що ефективність промивки залежить від комплексного впливу таких факторів як температура, швидкість течії двофазного миючого розчину, його концентрація, тривалість циркуляції та ін. Тому режими мийки молокопровідних ліній і параметри обладнання для цієї мети вимагають обґрунтування. На якість промивання молокопровідної лінії великий вплив чинить режими течії двофазного миючого розчину. Тому для початку необхідно теоретично дослідити процес переміщення двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії. Для реалізації чисельного моделювання процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки необхідно розробити фізико-математичний апарат руху двофазного миючого розчину по ній. В результаті теоретичних досліджень розроблено фізико-математичний апарат руху двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії, який оснований на рівняннях принципу суперпозиції сил і як наслідок тисків, неперервності течії, законів збереження мас, імпульсу і енергії.*

*Ключові слова: доїльна установка, система промивки, миючий розчин, двофазне середовище, фізико-математичний апарат.*

**Ф.26 . Рис. 1. Літ. 12.**

---

**1. Постановка проблеми**

Санітарно-гігієнічна якість виробленого молока – комплексна проблема, яка визначається низкою факторів. Засоби і методи контролю цих факторів регламентуються такими документами, як ДСТУ 3662:2018 [1], ДСТУ 2661:2010 [2], ДСП 4.4.4-011-98 [3], «Правил ветеринарно-санітарної експертизи молока і молочних продуктів та вимог щодо їх реалізації» [4]. У сучасних умовах виробництва молока вирішальне значення на його якісні показники надає санітарний стан молочно-доїльного обладнання. В процесі експлуатації доїльних установок на внутрішніх поверхнях їх трубопроводів утворюються різноманітні молочні відкладення, наявність яких призводить до забруднення молока, в результаті чого відбувається зниження його гатунку та ціни. Основна частка бактеріальних і механічних забруднень молока при дотриманні всіх необхідних умов утримання тваринницьких приміщень формується за рахунок недостатньо промитого молочно-доїльного обладнання [5]. Тому процес промивання його є однією з найважливіших технологічних операцій, від ефективності виконання якої залежить рівень первинної забрудненості молока. Застосування методів ефективного очищення молокопровідних шляхів доїльних установок – це важливий шлях поліпшення якості молока і підвищення продуктивності праці в молочному тваринництві.

---

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Сучасні доїльні установки як з верхнім так і з нижнім молокопроводом забезпечені сучасною елементною базою. Це стосується і систем промивки, які реалізовані на базі електронних автоматів промивки для управління технологічним процесом промивання і очистки молокопровідних ліній [6]. Однак існуюче обладнання не має можливості автоматично контролювати якість очищення молокопровідних ліній від молочних відкладень і відповідно до цього керувати режимними параметрами системи промивки. Ефективність промивки залежить від комплексного впливу таких факторів як температура, швидкість течії двофазного миючого розчину, його концентрація, тривалість циркуляції та ін. Тому режими мийки молокопровідних ліній і параметри обладнання для цієї мети вимагають обґрунтування. На якість промивання молокопровідної лінії великий вплив чинить режими течії двофазного миючого розчину [7]. Тому для початку необхідно теоретично дослідити процес переміщення двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії.

### 3. Мета дослідження

Для реалізації чисельного моделювання процесу промивання молокопровідної лінії доїльної установки розробити фізико-математичний апарат руху двофазного миючого розчину по ній.

### 4. Результати дослідження

Розробка математичного апарату руху двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії основана на фізичних законах: принцип суперпозиції сил і як наслідок тисків, неперервність течії, закони збереження мас, імпульсу і енергії. В основу теоретичних досліджень покладені методи диференційного та інтегрального числення.

Рух двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії розглянемо на основі узагальненої схеми, яка приведена на рис. 1. Повітря і миючий розчин проходять через молокопровідну лінію, яка має постійну площу поперечного перерізу. Вони утворюють повітряну фазу швидкість  $u_g$  нормальній до повітряної області  $A_g$  і швидкість рідини  $u_f$  нормальній до рідинної області  $A_f$ . Тому повна площа перерізу складає  $A = A_g + A_f$ . Для подальших розрахунків розглянемо елементарну довжину молокопровідної лінії  $dz$  в момент часу  $dt$ , яка нахилена на кут  $\theta$  до горизонту.

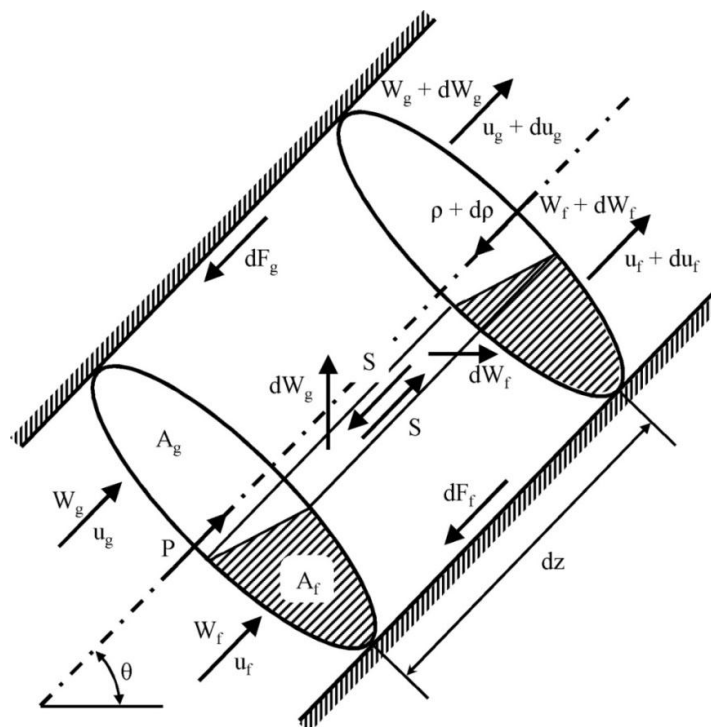


Рис. 1. Узагальнена схема руху двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії

Приймаємо  $u_g$ ,  $u_f$ ,  $A_g$  і  $A_f$  постійними. Згідно принципу суперпозиції сил і як наслідок тисків загальний перепад тиску (загальний градієнт статичного тиску) становить [8]:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g, \quad (1)$$

де  $\left(\frac{dp}{dz}\right)_F$  – фрикційний перепад тиску, Па/м;  $\left(\frac{dp}{dz}\right)_a$  – перепад тиску сил інерції, Па/м;  $\left(\frac{dp}{dz}\right)_g$  – гравітаційний перепад тиску, Па/м.

Чисту силу тертя, що діє на кожен фазу можна представити у вигляді [9]:

$$\left(dF_g + S\right) = -A_g \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fg} dz, \quad \left(dF_f - S\right) = -A_f \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Ff} dz, \quad dF_g + dF_f = -A \left(\frac{dp}{dz}\right)_F dz, \quad (2)$$

де індекси «g» і «f» відносяться до повітря і рідини відповідно;  $F$  – сила тертя, Н;  $A$  – площа поперечного перерізу області, м<sup>2</sup>;  $z$  – координата вздовж молокопровідної лінії, м;  $p$  – тиск, Па.

Падіння тиску сил інерції можна записати за наступною залежністю [10]:



$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_a = \frac{1}{A} \frac{d}{dz} (W_g u_g + W_f u_f) = G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 v_f}{1-\alpha} \right] \quad (3)$$

де  $W$  – масові витрати фази, кг/с:

$$W_g = GAx, \quad W_f = GA(1-x), \quad (4)$$

де  $G$  – масова швидкість фази, кг/(м<sup>2</sup>·с):

$$G = \rho u = \frac{u}{v}, \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність фази, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – швидкість фази, м/с;  $v$  – питомий об'єм фази, м<sup>3</sup>/кг;  $\alpha$  – частка повітря в області:

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad \text{і} \quad (1-\alpha) = \frac{A_f}{A}, \quad (6)$$

де  $x$  – масова частка повітря в області:

$$x = \frac{W_g}{W} = \frac{W_g}{W_g + W_f} \quad \text{і} \quad (1-x) = \frac{W_f}{W_g + W_f}. \quad (7)$$

Гравітаційних перепад тиску визначається за формулою:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_g = -g \sin \theta \left[ \frac{A_g}{A} \rho_g + \frac{A_f}{A} \rho_f \right] = -g \sin \theta [\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_f], \quad (8)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\theta$  – кут нахилу молокопровідної лінії відносно горизонту.

Надалі розглянемо моделі течії двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії.

Слід підкреслити, що для гомогенної моделі фрикційна складова була визначена через силу тертя, яку можна представити у вигляді [12]

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{F0} \left[ 1 + x \frac{v_{fg}}{v_f} \right], \quad (9)$$

де  $-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{F0}$  – градієнт тиску тертя, розрахований з рівняння Фаннінга для сумарного двофазного потоку, прийнятий для потоку рідини:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{F0} = \frac{2f_{F0} G^2 v_f}{D}, \quad (10)$$

де  $f_{F0}$  – коефіцієнт тертя, який визначається як функція числа Рейнольдса ( $Re = GD/\mu$ ) і відносної шорсткості труби ( $\varepsilon/D$ ):

$$f_{F0} = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & Re \leq 2000, \\ \left[ -41g \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7065} - \frac{5,0452}{Re} 1g \left( \frac{(\varepsilon/D)^{1,1098}}{2,8257} + \left( \frac{7,149}{Re} \right)^{0,8981} \right) \right) \right]^{-2}, & Re \geq 4000, \end{cases} \quad (11)$$

$\varepsilon$  – абсолютна шорсткість труби, м;  $D$  – діаметр молокопровідної лінії, м;  $\mu$  – динамічна в'язкість двофазного середовища, кг/(м·с).

$$\mu_{fg} = \frac{\mu_g \mu_f}{\mu_f x + (1-x) \mu_g}. \quad (12)$$



Враховуючи динамічну в'язкість рівняння (9) можна переписати у вигляді:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{F0} \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_f}\right)\right] = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{F0} \phi_{F0}^2, \quad (13)$$

де  $\phi_{F0}^2 = \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_f}\right)\right]$  – двофазний коефіцієнт тертя.

Враховуючи вище зазначене для гомогенної моделі течії двофазного миючого розчину загальний перепад тиску (загальний градієнт статичного тиску) становить:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = \frac{2f_{F0}G^2v_f}{D} \phi_{F0}^2 + G^2v_f \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right) \frac{dx}{dz} + \frac{g \sin \theta}{v_f \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right]}, \quad (14)$$

Для роздільної моделі течії двофазного миючого розчину загальний перепад тиску (загальний градієнт статичного тиску) становить:

$$\begin{aligned} -\left(\frac{dp}{dz}\right) &= \frac{2f_{F0}G^2v_f}{D} \phi_{F0}^2 + \\ &+ G^2 \frac{dx}{dz} \left[ \left(\frac{2xv_g}{\alpha} - \frac{2(1-x)v_f}{(1-\alpha)}\right) + \frac{d\alpha}{dz} \left(\frac{(1-x)^2v_f}{(1-\alpha)^2} - \frac{x^2v_g}{\alpha^2}\right) \right] + \\ &+ g \sin \theta [\rho_g \alpha + \rho_f (1-\alpha)] \end{aligned} \quad (15)$$

Для даної моделі існує багато співвідношень двофазного коефіцієнта тертя і частки повітря в області. Однак оберемо найбільш адекватні для двофазного середовища миючі розчини, які переміщуються по молокопровідній лінії, яка нахилена на кут менший  $\theta = 30^\circ$ .

Так кореляція Локхарта-Мартінеллі має наступні характеристики [12]

– режим течії визначається на підставі поведінки потоку (в'язкого або турбулентного), коли фази проходять самостійно через лінію;

– падіння тиску рідинної та повітряної фаз вважається рівним незалежно від структури потоку:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Ff} \phi_f^2 \text{ або } \left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fg} \phi_g^2. \quad (16)$$

Емпіричний множник  $X$  визначається як функція:

$$X = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Ff}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fg}}, \quad -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Ff} = \frac{2f_f G^2 v_f (1-x)^2}{D}, \quad -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fg} = \frac{2f_g G^2 v_g x^2}{D}. \quad (17)$$

Коефіцієнт тертя  $f$  визначається за формулою (11). Тоді для коефіцієнта тертя  $\phi^2$  маємо

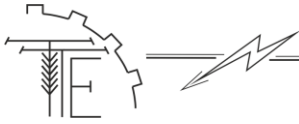
$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}, \quad \phi_g^2 = 1 + CX + X^2, \quad (18)$$

де  $C$  – емпіричний коефіцієнт, який визначено згідно досліджень [12].

Для гомогенної моделі течії частку повітря в області можна розрахувати за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \frac{\rho_g}{\rho_l}}, \quad (19)$$

Для роздільної моделі течії частку повітря в області можна розрахувати за формулою:



$$\alpha = \left[ 1 + \frac{\rho_g}{\rho_l} \left( \frac{1-x}{x} \right) \left( 0,4 + 0,6 \sqrt{\frac{\frac{\rho_l}{\rho_g} + 0,4 \frac{1-x}{x}}{1 + 0,4 \frac{1-x}{x}}} \right) \right] \quad (20)$$

Рух двофазного середовища миючого розчину по молокопровідній лінії підпорядковується всім законам збереження.

Так для закону безперервності модель двофазного потоку характеризується двома незалежними полями швидкості, які задають рух кожної фази. Найбільш природнім вибором полів швидкості  $\epsilon$ , очевидно, масові середні фазові швидкості  $u$  :

$$\alpha_q \frac{\partial \rho_q}{\partial t} + \rho_q \frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \alpha_q \rho_q \nabla u_q = \Gamma_q, \quad (21)$$

де  $\Gamma$  – швидкість фазової маси на границях розділу в одиниці об'єму, кг/(м<sup>3</sup>с); індекс «q» позначає фазу двофазного миючого розчину («g» для повітря і «f» для рідини).

Рівняння збереження імпульсу у формулюванні двофазної моделі виражається двома імпульсними рівняннями з умовою передачі міжфазного імпульсу. Відповідні рівняння повинні бути виражені через центр мас або барицентричною швидкістю кожної фази,  $u$ . Нижче описуються скалярні форми рівнянь імпульсу:

– x-компонента

$$\begin{aligned} \alpha_q \rho_q \left( \frac{\partial u_{xq}}{\partial t} + u_{xq} \frac{\partial u_{xq}}{\partial x} + u_{yq} \frac{\partial u_{xq}}{\partial y} + u_{zq} \frac{\partial u_{xq}}{\partial z} \right) = & -\alpha_q \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha_q \rho_q g_{xq} + \\ & + \left( \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xxq} + \tau_{xxq}^T) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yxq} + \tau_{yxq}^T) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zxq} + \tau_{zxq}^T) \right) + (p_{qi} - p_q) \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + \\ & + (u_{xqi} - u_{xq}) \Gamma_q + M_{ixq} - \left( \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} \tau_{xxqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} \tau_{yxqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} \tau_{zxqi} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

– y-компонента

$$\begin{aligned} \alpha_q \rho_q \left( \frac{\partial u_{yq}}{\partial t} + u_{xq} \frac{\partial u_{yq}}{\partial x} + u_{yq} \frac{\partial u_{yq}}{\partial y} + u_{zq} \frac{\partial u_{yq}}{\partial z} \right) = & -\alpha_q \frac{\partial p}{\partial y} + \alpha_q \rho_q g_{yq} + \\ & + \left( \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xyq} + \tau_{xyq}^T) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yyq} + \tau_{yyq}^T) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zyq} + \tau_{zyq}^T) \right) + (p_{qi} - p_q) \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} + \\ & + (u_{yqi} - u_{yq}) \Gamma_q + M_{iyq} - \left( \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} \tau_{xyqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} \tau_{yyqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} \tau_{zyqi} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

– z-компонента

$$\begin{aligned} \alpha_q \rho_q \left( \frac{\partial u_{zq}}{\partial t} + u_{xq} \frac{\partial u_{zq}}{\partial x} + u_{yq} \frac{\partial u_{zq}}{\partial y} + u_{zq} \frac{\partial u_{zq}}{\partial z} \right) = & -\alpha_q \frac{\partial p}{\partial z} + \alpha_q \rho_q g_{zq} + \\ & + \left( \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xzq} + \tau_{xzq}^T) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yzq} + \tau_{yzq}^T) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zzq} + \tau_{zzq}^T) \right) + (p_{qi} - p_q) \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} + \\ & + (u_{zqi} - u_{zq}) \Gamma_q + M_{izq} - \left( \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} \tau_{xzqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} \tau_{yzqi} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} \tau_{zzqi} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

де  $\tau$  – тензор напружень зсуву, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $M$  – зовнішній момент імпульсу, кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>); індекс «i» позначає фазу двофазного миючого розчину («g» для повітря і «f» для рідини).

Рівняння закону збереження енергії для двофазного середовища можна представити у вигляді



$$\begin{aligned} \rho_q \frac{\partial(i_q)}{\partial t} + i_q \frac{\partial(\rho_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_q i_q u_{xq})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_q i_q u_{yq})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_q i_q u_{zq})}{\partial z} = \\ = -p_q \left( \frac{\partial u_{xq}}{\partial x} + \frac{\partial u_{yq}}{\partial y} + \frac{\partial u_{zq}}{\partial z} \right) + k_q \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + E_q \end{aligned} \quad (25)$$

де  $i$  – енергія фази, Дж;  $T$  – температура фази, К;  $E$  – швидкість зміни питомої зовнішньої енергії Дж·кг/(с·м<sup>3</sup>);  $k$  – питома зміна коефіцієнта теплопровідності, Дж·кг/(с·м·К).

Для рідини:

$$p_l = p_l(\rho_l, T_l), \quad i_l = i_l(\rho_l, T_l) \quad (26)$$

Для газу:

$$p_g = \rho_g R T_g, \quad i_g = C_v T_g. \quad (27)$$

## 5. Висновки

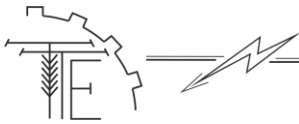
В результаті теоретичних досліджень розроблено фізико-математичний апарат руху двофазного миючого розчину по молокопровідній лінії, який оснований на рівняннях принципу суперпозиції сил і як наслідок тисків, неперервності течії, законів збереження мас, імпульсу і енергії

### Список використаних джерел

1. ДСТУ 3662:2018. (2018). Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови. Київ: Держстандарт України.
2. ДСТУ 2661:2010. (2010). Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови. Київ: Держстандарт України.
3. ДСП 4.4.4-011-98. (1998). Державні санітарні правила для молокопереробних підприємств. Редакція від 23.01.2006. Київ: Міністерство охорони здоров'я України. Головний державний санітарний лікар України.
4. Наказ 20.04.2004 № 49.(2004). Правил ветеринарно-санітарної експертизи молока і молочних продуктів та вимог щодо їх реалізації. Редакція від 08.10.2012. Київ: Міністерство аграрної політики України. Державний департамент ветеринарної медицини.
5. Палій А. П. Обґрунтування, розробка та ефективність застосування інноваційних технологій і технічних рішень у молочному скотарстві: автореф. дис. на здоб. наук. ступ. докт. сільськогосп. наук. – Миколаїв, 2018. – 40 с.
6. Шевченко І. А. Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок / І.А. Шевченко, Е. Б. Алієв, Запоріжжя: Акцент Інвест-трейд, 2013. – 156 с.
7. Хмельовський В. С. Механіко-технологічні основи використання вакуумних насосів доїльних установок: монографія / В. С. Хмельовський, С.І. Павленко, Ю.О. Линник, В.Ю. Дудін, Е.Б. Алієв. - К. : ЦП "Компринт", 2017. - 177 с.
8. Линник Ю. О. Дослідження динаміки змін коливань вакуумметричного тиску в автоматизованій доїльній установці / Ю. О. Линник, С. І. Павленко, А. В. Грицун // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця: ВНАУ, 2014. – №1 - С. 104 – 108.
9. Hwang S.T. A study on single- and two-phase pressure drop in branching conduits / S.T. Hwang, R.T. Lahey // Exp. Therm. Fluid Sci., 1988. – 1. - P. 111 – 125.
10. Kim S. M. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows / S. M. Kim, I. Mudawar // Int. J. Heat and Mass Transfer, 2012. - 55, P. 3246 – 3261.
11. Калетнік Г. М. Основи перспективних технологій виробництва продукції тваринництва / Г. М. Калетнік, М. Ф. Кулик, В. Ф. Петриченко та ін. – Вінниця: «Енозіс», 2007. – 584 с.
12. Ishi M. Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow / M. Ishi, T. Hibiki, Second Edition, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011. – 342 p.

### References

- [1] DSTU 3662:2018 (2018) *Moloko-syrovyna korov'yache. Tekhnichni umovy [Milk-raw cow's milk. Specifications]* Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny [in Ukrainian].



- [2] DSTU 2661:2010 (2010) *Moloko-syrovyna korov`yache. Tekhnichni umovy [Milk-raw cow's milk. Specifications]* Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny [in Ukrainian].
- [3] DSP 4.4.4-011-98 (1998) *Derzhavni sanitarni pravyla dlya molokopererobnykh pidpryyemstv. Redaktsiya vid 23.01.2006 [State sanitary rules for milk processing enterprises. Revision dated January 23, 2006]* Kyiv: Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrayiny. Holovnyy derzhavnyy sanitarnyy likar Ukrayiny [in Ukrainian].
- [4] *Nakaz 20.04.2004 N 49 (2004) Pravyl veterynarno-sanitarnoyi ekspertyzy moloka i molochnykh produktiv ta vymoh shchodo yikh realizatsiyi. Redaktsiya vid 08.10.2012 [Order of 04.04.2004 N 49. (2004). Rules of veterinary and sanitary examination of milk and dairy products and requirements for their implementation. Revised on 08/10/2012]* Kyiv: Ministerstvo ahrarynoyi polityky Ukrayiny. Derzhavnyy departament veterynarnoyi medytsyny [in Ukrainian].
- [5] Paliy, A. P. (2018). *Obgruntuvannya, rozrobka ta efektyvnist zastosuvannya innovatsiynykh tekhnolohiy i tekhnichnykh rishen u molochnomu skotarstvi [Substantiation, development and efficiency of application of innovative technologies and technical solutions in dairy cattle breeding]* Avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovoho stupenya doktora silskohospodarskykh nauk. Mykolayiv [in Ukrainian].
- [6] Shevchenko, I., Aliyev, E. (2013) *Naukovo-metodychni rekomendatsiyi z bahatokryterialnoho vyrobnychoho kontrolyu doylnykh ustanovok [Scientific and methodical recommendations on multi-criteria production control of milking installations]* Zaporizhzhya: Aktsent Invest-treyd [in Ukrainian].
- [7] Khmelovskyy, V., Pavlenko, S., Lynnyk, Y., Dudin, V., Aliyev, E. (2017) *Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy vykorystannya vakuumnykh nasosiv doylnykh ustanovok: monohrafiya [Mechanic-technological bases of use of vacuum pumps of milking plants: monograph]* Kyiv: TSP "Komprynt" [in Ukrainian].
- [8] Lynnyk, Y., Pavlenko, S., Hrytsun, A. (2014) *Doslidzhennya dynamiky zmin kolyvan vakuummetrychnoho tysku v avtomatyzovaniy doylniy ustanovtsi [Research of dynamics of variations of vibration of vacuum gauge pressure in an automated milking plant]*, 1, 104 – 108, Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. Vinnytsya: VNAU [in Ukrainian].
- [9] Hwang, S., Lahey, R. (1988) A study on single- and two-phase pressure drop in branching conduits, 1, 111 – 125, Exp. Therm. Fluid Sci.
- [10] Kim, S., Mudawar, I. (2012) Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows, 55, 3246 – 3261, Int. J. Heat and Mass Transfer.
- [11] Kaletnik, H., Kulyk, M., Petrychenko, V., Khorishko, V. (2007) *Osnovy perspektyvnykh tekhnolohiy vyrobnytstva produktsiyi tvarynnystva [Basis of advanced technologies of livestock production]* Vinnytsya: Enozis [in Ukrainian].
- [12] Ishi, M., Hibiki, T. (2011) *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Second Edition, Springer New York: Dordrecht Heidelberg London.

#### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ МОЮЩЕГО РАСТВОРА ПО МОЛОКОПРОВИДНОЙ ЛИНИИ

*Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что эффективность промывки зависит от комплексного воздействия таких факторов как температура, скорость течения двухфазного моющего раствора, его концентрация, продолжительность циркуляции и др. Поэтому режимы мойки молокопроводных линий и параметры оборудования для этой цели требуют обоснования. На качество промывки молокопроводной линии большое влияние оказывает режимы течения двухфазного моющего раствора. Поэтому для начала необходимо теоретически исследовать процесс перемещения двухфазного моющего раствора по молокопроводной линии. Для реализации численного моделирования процесса промывки молокопроводной линии доильной установки необходимо разработать физико-математический аппарат движения двухфазного моющего раствора по ней. В результате теоретических исследований разработан физико-математический аппарат движения двухфазного моющего раствора по молокопроводной линии, основанный на уравнениях принципа суперпозиции сил и как следствие давления, непрерывности течения, законов сохранения масс, импульса и энергии.*

*Ключевые слова: доильная установка, система промывки, моющий раствор, двухфазная*



среда, физико-математический аппарат.

Ф. 27. Рис. 1. Лит. 12.

#### PHYSICO-MATHEMATICAL APPARATUS OF THE MOVEMENT OF A TWO-PHASE MICRO-SOLUTION BY A MILK-CONDUCTIVE LINE

*An analysis of domestic and foreign studies has shown that the efficiency of washing depends on the complex influence of such factors as temperature, velocity of the flow of a two-phase washing solution, its concentration, circulation duration, etc. Therefore, the modes of milking milk lines and the equipment parameters for this purpose require justification. The quality of the flushing of the milk line is influenced by the two-phase washing solution's current regimes. Therefore, it is necessary to theoretically investigate the process of moving a two-phase washing solution through the milk pipeline to begin with. To implement numerical simulation of the process of flushing the milk line of the milking unit, it is necessary to develop a physical and mathematical apparatus for the movement of a two-phase detergent solution on it. As a result of theoretical studies, the physics and mathematical apparatus of motion of a two-phase washing solution on the milk pipeline line is developed, which is based on the equations of the principle of superposition of forces and as a consequence of pressures, continuity of the flow, laws of conservation of mass, momentum and energy.*

*Key words: milking system, washing system, washing solution, two-phase medium, physical and mathematical apparatus..*

F. 27. Fig. 1. Ref. 12.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Бабин Ігор Анатолійович** – асистент кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: babyn@vsau.vin.ua).

**Бабин Игорь Анатольевич** – ассистент кафедры «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: babyn@vsau.vin.ua)

**Babyn Ihor** – Assistant of the Department “Machinery and equipment for agricultural production” of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: babyn@vsau.vin.ua).