

**Гунько І. В.**

к. т. н., доцент

**Бабин І. А.**

асистент

*Вінницький національний  
аграрний університет***Hunko I.****Babyn I.***Vinnitsia National Agrarian  
University***УДК 637.116****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-1-12****ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА  
МОДЕЛЬ РОБОТИ  
ГІДРОІНЖЕКТОРА СИСТЕМИ  
ПРОМИВАННЯ ДОЇЛЬНИХ  
УСТАНОВОК**

У сучасних умовах виробництва молока вагомий вплив на його якісні показники має санітарний стан молочно-доїльного обладнання. В процесі експлуатації доїльних установок на внутрішніх поверхнях їх трубопроводів утворюються молочні відкладення, що мають різноманітний склад, властивості, товщину, міцність зчеплення з поверхнею. Їх наявність призводить до суттєвого забруднення молока, в результаті чого відбувається зниження його гатунку та ціни за реалізацію. Основна частка бактеріальних і механічних забруднень молока при дотриманні всіх необхідних санітарно-гігієнічних умов утримання тваринницьких приміщень та дійного стада формується за рахунок порушень режимів промивання молочно-доїльного обладнання. Таким чином, вирішення проблеми підвищення санітарної якості молока вимагає додаткових досліджень, а вдосконалення систем обслуговування молочної лінії доїльної установки та розробка нового технічного устаткування, що сприяє підвищенню ефективності процесу її промивання представляє як науковий, так і практичний інтерес. Одним з шляхів вирішення даної задачі є використання гідроінжектора, який представляє собою насадку із отвором круглої форми, через які під тиском, створюючи струмені, подається миючий розчин.

В статті наведено розроблена авторами фізико-математична модель процесу роботи гідроінжектора системи промивання, що створює струмінь миючого розчину направленої дії для очищення внутрішніх поверхонь молокопровідної системи. В результаті теоретичних досліджень отримано залежності радіусу області удару струменя і його тиску на поверхню молокопровідної системи від внутрішнього діаметра насадки, відстані до неї при різних значеннях тиску на виході насадки. Умовою ефективною роботи гідроінжектора у вигляді насадки із отвором круглої форми необхідною умовою є наявність максимального тиску на виході. Використовуючи елементну базу молочно-доїльного обладнання, в якості базового генератора гідравлічного тиску обрано молочний насос відцентрового типу низького тиску (3 атм). При цьому розрахункова сила дії струменя миючого розчину перевищує значення сили адгезії краплі молочного відкладення на поверхні молокопровідної системи, що підтверджує вірність проведених розрахунків.

**Ключові слова:** доїльна установка, система промивання, миючий розчин, гідроінжектор, поверхня, струмінь.



**Проблема.** Санітарно-гігієнічна якість виробленого молока – комплексна проблема, яка визначається низкою факторів. Засоби і методи контролю цих факторів регламентуються такими нормативними документами, як ДСТУ 3662:2018 [1], ДСТУ 2661:2010 [2], ДСП 4.4.4-011-98 [3], «Правила ветеринарно-санітарної експертизи молока і молочних продуктів та вимог щодо їх реалізації» [4]. Якість молока значною мірою залежить від санітарного стану молочно-доїльного обладнання. В процесі роботи доїльних установок на внутрішніх поверхнях їх трубопроводів утворюються залишки молока, молочні відкладення та інші забруднення, які можуть живильним середовищем для розвитку мікроорганізмів та бактерій. Це в свою чергу призводить до зниження ґатунку молока, його харчової цінності та ціни за реалізацію. Основна частка бактеріальних і механічних забруднень молока при дотриманні всіх необхідних умов утримання тваринницьких приміщень формується за рахунок недостатньо промитого молочно-доїльного обладнання [5, 6]. Тому процес його промивання 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 покращення якості молока і підвищення продуктивності праці в молочному тваринництві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні системи промивки на базі електронних апаратів базуються на

періодичному пропусканні через молокопровідні лінії кислотного і лужного миючих розчинів [7, 8]. Однак цього виявляється не достатньо для якісного промивання молокопровідної лінії при умові використання мінімальної кількості миючого розчину і найменшої тривалості зазначеного процесу. Тому для вирішення цієї задачі нами запропоновано використовувати гідроінжектор, який виконує функцію подачі миючого розчину під тиском у вигляді струменя на поверхні елементів молокопровідної лінії.

**Мета досліджень.** Аналіз впливу на ефективність процесу промивання елементів доїльної установки використання гідроінжектора шляхом розробки аналітичної фізико-математичної моделі його роботи.

**Матеріали і методи досліджень.** Розробка фізико-математичної моделі роботи гідроінжектора системи промивання основана на розрахунку параметрів струменя миючого розчину і його дії на поверхні молокопровідної системи із молочними відкладеннями. В основу теоретичних досліджень покладені методи диференційного та інтегрального числення.

**Результати досліджень.** Гідроінжектор представляє собою насадку із отвором круглої форми, через які під тиском подається миючий розчин, створюючи при цьому струмені.

На рис. 1 представлена схема зміни структури струменя миючого розчину в залежності від відстані між соплом насадки гідроінжектора і поверхні молоко провідної системи. Як видно зі схеми, швидкісний потік крапель миючої рідини, найбільш корисний для процесу промивання, знаходиться в перехідній області структури струменя.



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



На початковій області струменя м'якого розчину відбувається падіння швидкості по осі струменя  $Ox$  і по перетину вздовж радіусу  $r$ . За дослідженнями [9] довжина початкової області  $X_i$  визначається виразом

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

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

Зміна швидкості по осі струменя  $V_{j0}$  на перехідній області для осісиметричного струменя визначається залежністю [9]

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

де  $V_n$  – швидкість потоку рідини у насадці, м/с;

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

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

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

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

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

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

$x$  – відстань від початкового перетину струменя, м;

Поперечний профіль швидкості на перехідній області струменя має форму, близьку до кривої Гауса. Швидкість в довільній точці течії на перехідній області струменя визначається залежністю [9]

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

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

Радіус струменя  $R_t$  на основній ділянці визначається залежністю [9]

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

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

Закон збереження імпульсу струменя м'якого розчину для виходу його з насадки і для області контакту має вигляд

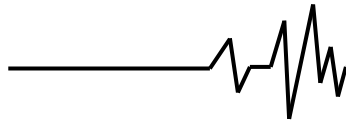
$$\rho_1 V_n^2 \left( \frac{\pi}{4} d_n^2 \right) = \rho_1 (\bar{V}_j(H_j))^2 (\pi R_a^2), \quad (7)$$

$$\text{або } V_n d_n = 2R_a \bar{V}_j(H_j),$$

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

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

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



З рівняння (5) і закону Бернуллі

$$(p_a = \frac{\rho_1}{2} (\overline{V}_j(H_j))^2) \text{ отримуємо}$$

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

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

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

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

де  $p_n$  – тиск на виході насадки, Па.  
Підставляючи (10) в (9) остаточно маємо

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

Графічна інтерпретація залежностей (8) і (11) представлені на рис. 2 і 3 відповідно.

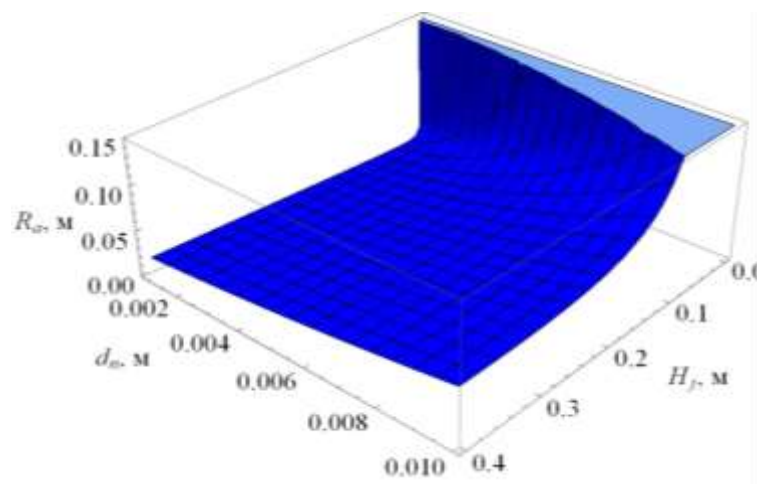


Рис. 2 – Залежність радіусу області удару струменя  $R_a$  від внутрішнього діаметра насадки  $d_n$  і відстані до неї  $H_j$

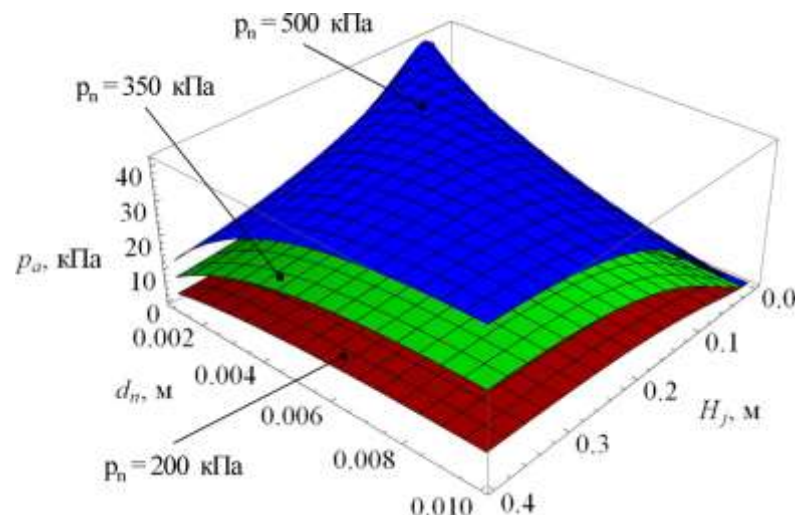


Рис. 3– Залежність тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  від внутрішнього діаметра насадки  $d_n$  і відстані до неї  $H_j$  при різних значеннях тиску на виході насадки  $p_n$



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

Для визначення раціональних значень внутрішнього діаметра насадки  $d_n$  і відстані до неї  $H_j$  вирішимо в програмному пакеті Mathematica (додаток Д) задачу максимізації тиску струменя на поверхню молокопровідної системи  $p_a$

$$p_a(d_n = 2,1 \text{ мм}, H_j = 16,6 \text{ см}) = 42,0 \text{ кПа}$$

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

$$F_c = c_1 \sigma_{ml} r_k (\cos \gamma - \cos \beta), \quad (13)$$

де  $c_1$  – емпіричний коефіцієнт  $c_1 \approx 1,5$  [10];  
 $\sigma_{ml}$  – поверхневий натяг краплі між миючим розчином і відкладенням, Н/м;  
 $r_k$  – радіус площі контакту краплі, м [12,13];

$$r_k = \sqrt{\frac{24 \sin^3 \beta (\cos \gamma - \cos \beta) \sigma_{ml}}{\rho_m g (1 - \cos \beta)^2 (2 + \cos \beta) \sin \theta}}, \quad (14)$$

$\beta, \gamma$  – краєві кути краплі;  
 $\rho_m$  – густина відкладення, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $\theta$  – кут нахилу молокопровідної лінії.

**Висновки.** Розроблено вперше фізико-математичну модель процесу роботи гідроінжектора системи промивки, що створює струмінь миючого розчину направленої дії для очищення внутрішніх поверхонь молокопровідної системи. В результаті чисельного експерименту отримані залежності радіусу області удару струменя  $R_a$  і його тиску на поверхню молокопровідної системи  $p_a$  від внутрішнього діаметра насадки  $d_n$ , відстані до неї  $H_j$  при різних значеннях тиску на виході насадки  $p_n$ . Використовуючи елементну базу молочно-доїльного обладнання за базовий генератор гідравлічного тиску обрано молочний насос

відцентрового типу низького тиску ( $\approx 3$  атм). При цьому конструктивними параметрами гідроінжектора, які забезпечують максимальний тиск на виході насадки  $p_n$  і відповідають завданню підвищення ефективності промивки молокопровідної системи є:  $d_n = 2,1$  мм,  $H_j = 16,6$  см,  $R_a = 23,6$  мм.

#### 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 N 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. (2018). Обґрунтування, розробка та ефективність застосування інноваційних технологій і технічних рішень у молочному скотарстві. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора сільськогосподарських наук. Миколаїв. 60 с.
6. Шевченко І.А., Алієв Е.Б. (2012). Підвищення якості виконання технологічного процесу машинного доїння. Вісник аграрної науки. 2012. №6. С. 57-59.
7. Бабин, І. А. (2019). Обґрунтування режимів роботи системи промивання молокопроводів доїльної установки. Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. 4 (107). С. 89–99. DOI: 10.37128/2520-6168-2019-4-11
8. Pryshliak Viktor, Babyn Igor (2019). Justification of the modes of the milk washing system of the milking installation. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Vol. 19. No. 4. P. 5–12.
9. Абрамович, Г. Н. (2011). Теория турбулентных струй. Репринтно евоспроизведение издания 1960 г. М.: ЭКОЛИТ. 720 с.
10. 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.
11. Kim, S.M. and Mudawar, I., (2012), Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-



channelflows, Int. J. Heat and Mass Transfer 55, p. 3246–3261.

12. Tsuyoshi Hattori, Seiichi Koshizuka (2019). Numerical simulation of droplet behavior on an inclined plate using the Moving Particle Semi-implicit method. Mechanical Engineering Journal. Bulletin of the JSME. Vol. 6. No. 5. P. 1–16. DOI: 10.1299/mej.19-00204.

13. Hattori, T., Hiai, D., Akaike, S., Koshizuka, S. (2016). Improvement of wetting calculation model on polygon wall in the MPS method. Transactions of the JSME (in Japanese). Vol. 82. No. 835. DOI:10.1299/transjsme.15-00602.

### Список джерел у транслітерації

1. DSTU 3662:2018. (2018). Moloko-syrovyna korov'yache. Tekhnichni umovy. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy.

2. DSTU 2661:2010. (2010). Moloko-syrovyna korov'yache. Tekhnichni umovy. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy.

3. DSP 4.4.4-011-98. (1998). Derzhavni sanitarni pravyla dlya molokopererobnykh pidpnyemstv. Redaktsiya vid 23.01.2006. Kyiv: Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrainy. Holovnyy derzhavnyy sanitarnyy likar Ukrainy.

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. Kyiv: Ministerstvo ahraryoi polityky Ukrainy. Derzhavnyy departament veterynarnoyi medytsyny.

5. Paliy, A. P. (2018). Obgruntuvannya, rozrobka ta efektyvnist' zastosuvannya innovatsiynykh tekhnolohiy i tekhnichnykh rishen' u molochnomu skotarstvi. Avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovoho stupenya doktora sil's'kohospodars'kykh nauk. Mykolayiv. 60 s.

6. Shevchenko I.A., Aliyev E.B. (2012). Pidvyshchennya yakosti vykonannya tekhnolohichnoho protsesu mashynnoho doynnya. Visnyk ahraryoi nauky. 2012. №6. S. 57-59.

7. Babyn, I. A. (2019). Obgruntuvannya rezhymiv roboty systemy promyvannya molokoprovodiv doyl'noyi ustanovky. Vseukrayins'ky naukovy – tekhnichnyy zhurnal «Tekhnika, enerhetyka, transport APK» / Redkolehiya: Kaletnik H.M. (holovnyy redaktor) ta inshi. Vinnytsya. 4 (107). S. 89–99. DOI: 10.37128/2520-6168-2019-4-11

8. Pryshliak Viktor, Babyn Igor (2019). Justification of the modes of the milk washing system of the milking installation. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Vol. 19. No. 4. P. 5–12.

9. Abramovych, H. N. (2011). Teoryya turbulentnykh struy. Reprintnoe vosproyzedvenye yzdannya 1960 h. M.: ÉKOLYT. 720 s.

10. Kaletnik H. M. Osnovy perspektyvnykh tekhnolohiy vyrobnytstva produktsiyi tvarynnytstva / H. M. Kaletnik, M. F. Kulyk, V. F. Petrychenko ta in. –

Vinnytsya: «Enozis», 2007 - 584 s.

11. Kim, S.M. and Mudawar, I., (2012), Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows, Int. J. Heat and Mass Transfer 55, p. 3246–3261.

12. Tsuyoshi Hattori, Seiichi Koshizuka (2019). Numerical simulation of droplet behavior on an inclined plate using the Moving Particle Semi-implicit method. Mechanical Engineering Journal. Bulletin of the JSME. Vol. 6. No. 5. P. 1–16. DOI: 10.1299/mej.19-00204.

13. Hattori, T., Hiai, D., Akaike, S., Koshizuka, S. (2016). Improvement of wetting calculation model on polygon wall in the MPS method. Transactions of the JSME (in Japanese). Vol. 82. No. 835. DOI:10.1299/transjsme.15-00602.

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ГИДРОИНЖЕКТОРА СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В современных условиях производства молока существенное влияние на его качественные показатели имеет санитарное состояние молочно-доильного оборудования. В процессе эксплуатации доильных установок на внутренних поверхностях их трубопроводов образуются молочные отложения, имеющие разнообразный состав, свойства, толщину, прочность сцепления с поверхностью. Их наличие приводит к существенному загрязнению молока, в результате чего происходит снижение его качества и цены при реализации.

Основная доля бактериальных и механических загрязнений молока при соблюдении всех необходимых санитарно-гигиенических условий содержания животноводческих помещений и дойного стада формируется за счет нарушений режимов промывки молочно-доильного оборудования. Таким образом, решение проблемы повышения санитарного качества молока требует дополнительных исследований, а совершенствование систем обслуживания молочной линии доильной установки и разработка нового технического оборудования, что способствует повышению эффективности процесса промывки представляет как научный, так и практический интерес. Одним из путей решения данной задачи является использование гидроинжектора, представляющий собой насадку с отверстием круглой формы, через которое под давлением, создавая струи, подается моющий раствор.

В статье приведена разработанная авторами физико-математическая модель процесса работы гидроинжектора системы промывки, которая создает струю мощного раствора направленного действия для очистки



внутренних поверхностей молокопроводной системы. В результате теоретических исследований получены зависимости радиуса области удара струи и его давление на поверхность молокопроводной системы от внутреннего диаметра насадки, расстояния до нее при различных значениях давления на выходе насадки. Условием эффективной работы гидроинжектора в виде насадки с отверстием круглой формы необходимым является наличие максимального давления на выходе. Используя элементную базу молочно-доильного оборудования, в качестве базового генератора гидравлического давления избран молочный насос центробежного типа низкого давления (3 атм). При этом расчетная сила действия струи мощного раствора превышает значение силы адгезии капли молочного отложения на поверхности молокопроводной системы, подтверждает верность проведенных расчетов.

**Ключевые слова:** доильная установка, система промывки, мощный раствор, гидроинжектор, поверхность, струя.

#### PHYSICO-MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDRO-INJECTOR'S OPERATION OF THE DAIRY PROCESSING PLANTS' WASHING SYSTEM

In the current conditions of dairy production, the sanitary state of dairy and milking equipment has a significant influence on its quality indicators. In the process of dairy processing plants' operation on the internal surfaces of their pipelines milk sediments are formed, which have different composition, properties, thickness, strength of adhesion to the surface. Their presence leads to significant contamination of milk, resulting in a decrease of its quality and prices for sale. The main share of bacterial and mechanical

contamination of milk while observing all the necessary sanitary and hygienic conditions of keeping livestock premises and the actual herd is formed because of the modes violations of washing milk and milking equipment. Thus, solving the problem of improving the sanitary quality of milk requires further research, and the improvement of milking line maintenance systems and the development of new technical equipment which contributes to the efficiency of its washing process and becomes of scientific and practical interests. One way to solve this problem is to use a hydro-injector, which is a nozzle with an opening of circular shape, through which under pressure, creating streams, a cleaning solution is brought.

The article deals with the physico-mathematical model of the operational process of the hydro-injector's washing system, which creates a directed stream of detergent for cleaning the inner surfaces of the milk-conducting system. As a result of theoretical studies, the dependence of the radius of the stream impact area and its pressure on the surface of the milk-transport system from the inner diameter of the nozzle, the distance to it at different values of the nozzle outlet pressure, have been obtained. As the condition of effective operation of the hydro-injector in the form of a nozzle with a circular hole there must be the maximum outlet pressure. Using the elemental basis of dairy-milking equipment, a low-pressure centrifugal milk centrifugal pump (3 atm.) has been selected as the basic hydraulic pressure generator. In this case, the calculated force of the stream of detergent exceeds the value of the adhesion force of the droplets of milk sediments on the surface of the milk transport system, which confirms the accuracy of the received calculations.

**Key words:** dairy processing plant, washing system, detergent, hydro-injector, surface, stream.

#### Відомості про авторів

**Гулько Ірина Василівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загально технічних дисциплін та охорони праці, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [iryngunko@vsau.vin.ua](mailto:iryngunko@vsau.vin.ua)).

**Бабін 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](mailto:babyn@vsau.vin.ua)).

**Гулько Ірина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда, Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [iryngunko@vsau.vin.ua](mailto:iryngunko@vsau.vin.ua)).

**Бабін Ігорь 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](mailto:babyn@vsau.vin.ua)).

**Gunko Iryna** – PhD, Associate Professor of the department of general technical disciplines and labor protection, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sunny St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [iryngunko@vsau.vin.ua](mailto:iryngunko@vsau.vin.ua)).

**Babyn Ihor** – assistant of the department of machines and equipment of agricultural production, Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [babyn@vsau.vin.ua](mailto:babyn@vsau.vin.ua)).