

УДК 641. 41

*Ощипок І. М.,*

*ORCID ID: 0000-0002-5427-3376, Researcher ID: F-4641-2019,*

*д.т.н., проф., завідувач кафедри харчових технологій, Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів*

*Кравченко Х. Ю.,*

*ORCID ID: 0000-0002-7547-6834,*

*старший лаборант, кафедра харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль*

*Стадник І. Я.,*

*ORCID ID: 0000-0003-4126-3256,*

*д.т.н., проф., професор кафедри обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ РІДИНИ У ТРАНСПОРТУЮЧИХ МЕРЕЖАХ МОЛОЧНОЇ ГАЛУЗІ**

**Анотація.** Розглянуто фізичну сутність впливу гідравлічних опорів та вершин шорсткості в примежовому шарі з великим градієнтом швидкості мюючих засобів в транспортуючих трубопроводах сировини на адгезію, що встановлює залежність від форми, градієнта швидкості і кута шорсткості, прикладання механічних сил, ступеня попередньої дисперсності й фізико-механічних властивостей середовища. Встановлено характер контактної взаємодії бактеріальної біоплівки з шорсткою поверхнею у транспортуючому трубопроводі та шляхи деградації біоплівки. Порушення цих взаємних співвідношень призводить до ефективної санітарної обробки і, відповідно, до випуску якісної продукції та її терміну зберігання. Обґрунтовано площу контакту адгезиву та складові, що формують роботу на подолання адгезії і деформації середовища при визначенні критеріїв, які впливають на процес, відповідно до кожного певного періоду стадії деформації. Одержані дані дають відповідь на ряд запитань про можливість взаємодії поверхні з середовищем, що встановлюють реальну зміну контакту адгезиву в трубопроводі. Встановлено, що для забезпечення змінної площі фактичного контакту, що сприяє кращій деградації біоплівки і, відповідно, проходженню якісного процесу санітарної обробки поверхонь, необхідною умовою є додержання швидкості руху мюючих засобів до відповідних технологічних параметрів.

**Ключові слова:** біоплівка, адгезія, площа контакту, градієнт швидкості.

*Oshchypok I. M.,*

*ORCID ID: 0000-0002-5427-3376, Researcher ID: F-4641-2019,*

*Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Food Technologies, Lviv University of Trade and Economics, Lviv*

*Kravchenyuk H. Yu.,*

*ORCID ID: 0000-0002-7547-6834,*

*Senior Laboratory Assistant, Department of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil*

*Stadnyk I. Ya.,*

*ORCID ID: 0000-0003-4126-3256,*

*Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Food Technologies Equipment, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil*

## DETERMINATION OF THE LIQUID MOVEMENT DYNAMICS IN THE DAIRY INDUSTRY TRANSPORTATION NETWORKS

**Abstract.** *The physical essence of the influence of the hydraulic resistance and roughness vertexes in the adjoining layer with a large velocity gradient of detergents in the transport pipelines of raw materials on adhesion, which establishes dependence on the shape, velocity gradient and angle of roughness, application of mechanical forces, the degree of previous dispersion and physical and mechanical properties of the medium are considered. The nature of the contact interaction of a bacterial biofilm with a rough surface in the transport pipeline and the ways of degradation of the biofilm are determined. Violations of these mutual relations lead to efficient sanitary treatment, and, accordingly, the production of quality products and their appropriate shelf life. The contact area of the adhesive and the component forming work for overcoming the adhesion and deformation of the environment in determining the criteria influencing the process according to each particular period of the deformation stage are substantiated. The obtained data give an answer to a number of questions about the possibility of interaction between the surface and the environment, which establishes a real change in the adhesion contact in the pipeline. It was determined that in order to provide a variable area of actual contact, which contributes to better degradation of biofilms, and, accordingly, passing of a qualitative process of sanitary treatment of surfaces, the necessary condition is to maintain the velocity of movement of detergents to the corresponding technological parameters.*

**Key words:** *biofilm, adhesion, contact area, velocity gradient.*

**JEL Classification:** *L79; O13; O39.*

**DOI:** <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2019-22-05>

**Постановка проблеми.** Ключовим завданням молочної галузі є виробництво достатньої кількості якісних та безпечних молочних продуктів. Основний чинник, який знижує терміни зберігання і безпечність молочних продуктів, – це мікроорганізми [1, 2]. Вважається, що адгезія бактерій до поверхні – це складний фізико-хімічний процес, який залежить від властивостей поверхні, таких як топографія, шорсткість, гідрофобність, хімічний склад та поверхнева енергія; від початкової кількості мікроорганізмів, їх розмірів, температури і рН навколишнього середовища та ін. [3]. Проте серед багатьох наведених чинників, які впливають на процес адгезії, дослідники [3, 4] вважають, що властивості поверхні відіграють основну роль.

Загальновідомо, що молоко-сировина, яке надходить на молокопереробні підприємства, не є стерильним, а у молоці найвищої якості екстра гатунку згідно з ДСТУ 3662–2015 допускається вміст мікроорганізмів до 105 КУО/см<sup>3</sup>. Ця мікрофлора формується під час отримання молока, його первинної обробки, охолодження та транспортування. Відповідно, на молокопереробних підприємствах мікроорганізми молока-сировини формують мікрофлору технологічного обладнання, незважаючи на застосування ретельної санітарної обробки сучасними дезінфікуючими засобами. Дослідженнями встановлено, що навіть за стандартної санітарної обробки сучасними мийними і дезінфікуючими засобами обладнання не є стерильним. Це дає підставу вважати, що після проведення дезінфекції поверхні обладнання на його поверхнях залишаються лише бактерії, які мають здатність продукувати біоплівки високої і середньої щільності. Тому навіть за умови використання автоматичних СІР-установок повинен бути постійний мікробіологічний контроль ефективності проведеної санітарної обробки на підприємствах. Надійний контроль за цим процесом буде

гарантувати виробництво безпечної за мікробіологічними показниками молочної продукції і впевненість у її якості під час зберігання.

У харчовій промисловості для обладнання найчастіше використовують нержавіючу сталь. Дані марки сталі можуть мати різну шорсткість поверхні. Тому нині науковці [3, 4] вивчають вплив на процес деградації плівки в харчовій промисловості, крім їх біологічних властивостей, ще й технічні властивості матеріалу, до якого відбувається адгезія (шорсткість, поверхнева вільна енергія, змочуваність та ін.). Таким чином, більш глибоке розкриття механізмів і закономірностей деградації мікробних біоплівок на абіогенних поверхнях у харчовій промисловості дозволить розробити превентивні заходи боротьби з ними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні не існує однозначного визначення адгезії, а існуючі її визначення як процесу, як властивостей, які характеризують особливість даної системи, було розкрито в роботах А. А. Берлина, В. Е. Басина, О. Д. Зимона, П. А. Ребіндера. З їх визначення – це виникнення зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних (твердих або рідких) тіл (фаз), які дотикаються між собою. До факторів, які визначають силу адгезії, в першу чергу можна віднести властивості поверхонь, які контактують між собою. У випадку контакту структурно-пластичного тіла, яким є біоплівка, адгезію доцільно буде розглядати як процес, що відбувається в часі при контакті двох тіл та полягає у поступовому виникненні зв'язку між ними. Порушення адгезійного зв'язку теж слід розглядати як процес, що відбувається в часі при санітарній обробці. З проведеного аналізу виникнення і порушення адгезії як процесу, що протікає в часі, факторами, які впливають на процес, можна вважати температуру, зовнішнє зусилля та тривалість контакту. На порушення адгезійного зв'язку, тобто деградації

біоплівки, крім дійсного значення зусилля відриву, також включається зусилля, що витрачається на подолання побічних процесів.

Так, при ліквідації адгезійних зв'язків шляхом відривання їх від досліджуваної поверхні миючими засобами певні зусилля спрямовуються на подолання гідродинамічних опорів та внутрішніх напруг. При відриванні структурованої маси бактеріальної плівки адгезійна міцність вступає в конкуренцію з когезійною міцністю маси пограничного шару плівки. При відриві відбувається її деформація на фактичній площі контакту. Адаже на величину площі фактичного контакту впливає багато факторів: нормальний тиск, природа миючих засобів, швидкість потоку, а також зовнішні чинники – температура, напруженість, тривалість попереднього навантаження, швидкість зростання зусилля відриву. Ці фактори здійснюють різний вплив на зміну фактичної площі контакту.

У зв'язку з цим в інтересах оптимізованого синтезу необхідною є інформація, яка стосується явищ і особливостей адгезії, можливостей її трансформації в кінематичних парах в бік зменшення. Різновиди мийних засобів та рух їх при санітарній обробці є рушійною силою, яка створюється внаслідок різниці тисків. Створений напірний рух миючого засобу у трубопроводі зі своїми особливостями контактує з параметрами поверхонь, коефіцієнтами гідравлічного тертя і місцевими гідравлічними опорами.

**Постановка завдання.** Розрізняють два види втрат напору: по довжині трубопроводу  $h$  і на місцеві опори,  $h_m$ . Місцеві і гідравлічні опори зумовлюються явищами додаткового тертя на порівняно коротких ділянках трубопроводів унаслідок деформації потоку за зміни форми живого перерізу, напрямку і режиму руху. Аналіз втрат напору за рівнянням Бернуллі показує, що втрати опорів будь-якого типу пропорційні динамічному напору і виражаються формулою

$$\text{Весбаха в одиницях напору, м [4]. } h_m = \zeta \frac{\omega^2}{2g} \text{ або}$$

$$\text{в одиницях тиску, Па } \Delta p = \xi \frac{\rho \omega^2}{2},$$

де  $\zeta$  - коефіцієнт місцевого опору;  $\rho$  - густина рідини,  $\omega$  - швидкість потоку, яка визначається відношенням об'ємної витрати рідини  $Q$ , м<sup>3</sup>/с до площі живого перерізу  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$\omega = \frac{Q}{S}$$

Враховуючи те, що відбувається турбулентний рух, для визначення втрат використовується формула Дарсі-Вейсбаха

$$h_i = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \text{ і величина втрат тиску,}$$

де  $\lambda$  коефіцієнт гідравлічного тертя,  $\lambda = 64 / Re$ ;  $l$  - ділянка трубопроводу, м;  $d$  - діаметр трубопроводу, м.

Відомо, що у центральній частині потоку реалізовується турбулентний рух і усереднена швидкість змінюється мало. Біля стінок - у прилеглому шарі з великим градієнтом швидкості, відбувається ламінарний рух. Зі збільшенням швидкості руху товщина ламінарного шару зменшується і на рух починають впливати вершини шорсткості. В такому випадку коефіцієнт гідравлічного тертя розраховується формулою:

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)$$

де  $\Delta$  - висота шорсткостей поверхні трубопроводу.

Встановлення режиму течії в трубопроводі вимагає досить складних розрахунків і визначення основних коефіцієнтів, що входять до складових формул і визначають цей рух. Отже, попередній місцевий опір впливає на місцевий опір, розміщений за ним, що унеможливає проведення розрахунків втрат швидкості і тиску рідинного потоку. Дослідити динаміку руху рідини в трубопроводі зі складною конфігурацією внутрішньої поверхні, визначити значення коефіцієнтів їх гідравлічних місцевих опорів дають змогу сучасні програмні комплекси математичного моделювання тривимірних потоків рідин та газів ANSYS CFX, Flow Vision, Flow3D.

Математичною моделлю руху рідини, яка застосовується в Flow Vision, є сукупність рівнянь конвективно-дифузного переносу. В загальній диференціальній формі ці рівняння мають такий вигляд:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(Vf) = \nabla(D\nabla f) + Q,$$

де  $f$  - змінна, яка розраховується;  $t$  - час; - оператор Гамільтона;  $V$  - швидкість;  $D$  - коефіцієнт дифузії;  $Q$  - вхідний параметр.

У Flow Vision застосовується метод скінчених об'ємів і розв'язок рівняння інтегрується по об'єму кожної  $i$ -ої комірки розрахункової сітки та по часу (крок часу)  $\tau$ :

$$V_i (f_{n+1}^i - f_n^i) + \sum_j F_i^j s_i^j + \sum_j G_i^j g_i^j + Q_i = 0,$$

де  $Q_i$  - об'ємний вхідний параметр змінної  $f$ ;  $f$  -  $n$  - середнє значення змінної по об'єму комірки в момент часу  $t_n$ ,  $V_i$  - об'єм комірки;  $S_i$  - площа комірки;  $t_n, t_{n+1}$  - моменти початку і кінця кроку по часу  $t_{n+1} = t_n + \tau$

$$V_i f_i^n = \int_{V_i} f dV \Big|_{t^n}$$

Середні густини потоків розрахункових змінних  $jF_i$  і  $G_i$  через вільні грані  $S_j$  і тверді грані  $g_i$  за крок по часу рівні:

$$F_i^j = \int_{S_j} (jV + D\nabla j) H_i \Big|_{S_j}$$

$$G_i^j = \int_{S_j} (j_{w,j} V_{w,j} + D(\nabla j)_{w,j}) H_i \Big|_{S_j}$$

де  $w$  – індекс, який відповідає значенню відповідних величин на границі розрахункової області, яка відповідає грані  $g_i$ .

Першим кроком моделювання руху рідини в з'єднаннях є створення тривимірної геометричної моделі з прилеглими ділянками трубопроводу. Тривимірні моделі створювались у програмному комплексі MSC Nastran, після чого вони імпортувались у програмний комплекс Flow Vision. Конструкція та геометричні розміри створених тривимірних геометричних моделей ідентичні промисловим зразкам.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження динаміки руху рідини використано математичну модель турбулентного нестисливого потоку, яка базується на застосуванні для розв'язку рівняння Нав'є-Стокса, що дає змогу розрахувати розподіл швидкості та тиску вздовж трубопроводу. Рівняння Нав'є-Стокса – система диференціальних рівнянь у часткових похідних, що описує рух ньютонівських рідин.

Для моделювання динаміки руху нержавіючих трубопроводів було задано стандартну  $k$ - $\epsilon$  ( $k$  – турбулентна енергія,  $\epsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії) модель турбулентності. Вона дозволяє отримати достатньо точні результати, а час розрахунку є значно менший, ніж у разі використання інших моделей турбулентності і в середньому складає 5 годин для кожного варіанта.

Для стандартної  $k$ - $\epsilon$  моделі турбулентності турбулентна динамічна в'язкість дорівнює:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

де  $C_\mu$  – коефіцієнт, який приймається рівним  $C_\mu = 0,09$ . Рівняння переносу турбулентної енергії  $k$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho j k) =$$

$$= \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \epsilon$$

де  $\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість;  $\sigma_k$  – коефіцієнт (дорівнює одиниці);

$G$  – параметр.

Рівняння переносу турбулентної дисипації  $\epsilon$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho j \epsilon) =$$

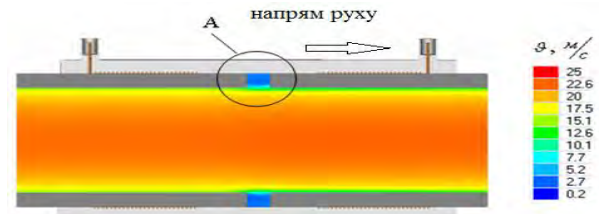
$$= \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

де  $\sigma_\epsilon$  – коефіцієнт, який рівний 1,3;  $C_1$  – коефіцієнт, який рівний  $C_1 = 1,44$ ;

$C_2$  – коефіцієнт, який рівний  $C_2 = 1,92$ .

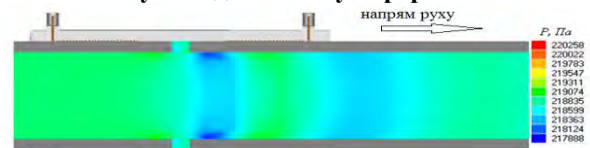
За описаною вище методикою проведено моделювання течії рідини на лабораторній установці ділянкою нержавіючого трубопроводу довжиною  $L=2.5$  м, по середині якої встановлено з'єднання. Зовнішній діаметр труб приймаємо рівним  $D_t = 40$  мм, товщину стінки  $\delta_t = 3,5$  мм.

Як видно з перерізу труби по модулю швидкості та векторів швидкості (рис. 1) рідинного потоку у місці з'єднань нержавіючих труб утворюється стійкий вихор, який призводить до незначного падіння тиску, що видно на рисунку по тиску та графіку зміни тиску вздовж трубопроводу



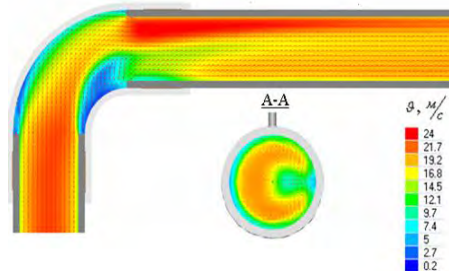
(рис. 2).

**Рис. 1. Розподіл модуля швидкості потоку рідини у поперевному перерізі**



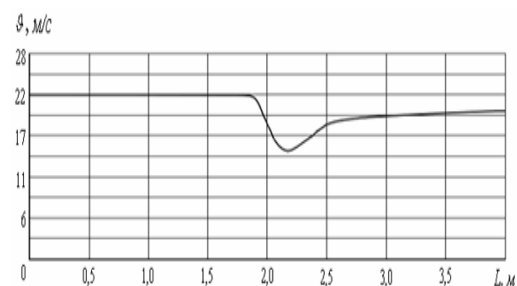
**Рис. 2. Розподіл та зміна тиску у поперевному перерізі**

Під час проходження потоку коліном, у місці різкого розширення біля зовнішньої стінки утворюється незначний вихор, а біля внутрішньої стінки відбувається значне зниження швидкості потоку з відривом потоку від стінки й утворенням значного вихору. Такий розподіл швидкостей є не характерним для колін і зумовлений наявністю різкого розширення та різкого звуження та є однією з причин значного падіння тиску на виході потоку коліна, що видно з перерізу коліна по тиску та графіку зміни тиску (рис. 3, 4).



а) вектори швидкості;

б)



б) зміна швидкості

Рис. 3. Розподіл модуля швидкості

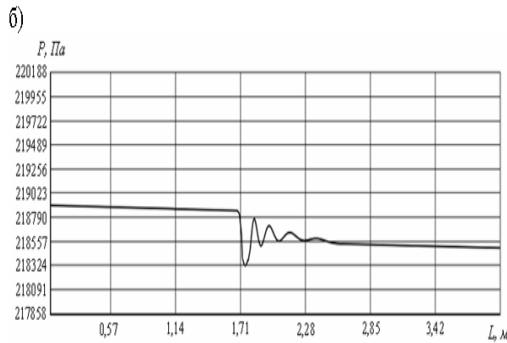
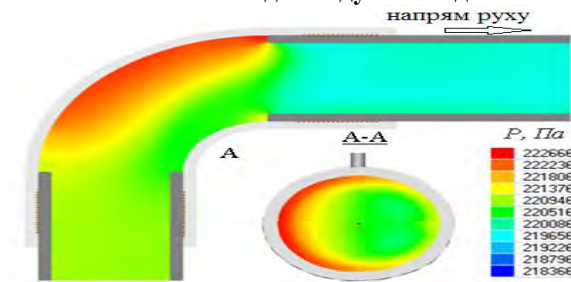


Рис. 4. Розподіл та зміна тиску рідини у повздожньому перерізі

Теоретичні дослідження динаміки руху рідини місцевими опорами трубопроводів дозволили виявити, що у з'єднаннях спостерігається вихороутворення, наявний реверсний рух рідини, відбувається відривання потоку від стінки з'єднання, що, у свою чергу, приводить до значних втрат швидкості і тиску. Визначення впливу втрат на швидкість та тиску рідинного потоку дозволяє встановити шляхи вдосконалення технології проведення санітарної обробки обладнання. Вдосконалення санітарної обробки полягає у виключенні чи суттєвому зменшенні втрат, виявлених під час теоретичних досліджень. Наші припущення полягають в тому, що у цих місцях найбільш можливі утворення біоплівки.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Отже, проведення досліджень за допомогою програмного комплексу Flow Vision у моделюванні тривимірних потоків рідин із визначення динаміки їх руху у місцевих опорах трубопроводів дозволяє відслідковувати зміни зовнішніх тисків та динаміку швидкості й внутрішніх тисків системи. Уточнення ролі окремих факторів системи можливо встановити без використання складних математичних залежностей. Це дозволяє глибше зрозуміти процес та з'ясування впливу шорсткості й місцевих опорів на деградацію мікробної адгезії, сприятиме вдосконаленню та модифікації поверхонь, створення нових методик і технологій санітарної обробки, спрямованих на якісний стан обладнання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Moriarty T. F., Poulsson A. H. C., Rochford E. T. J., Richards R. G. Bacterial Adhesion and Biomaterial

Surfaces, In: P. Ducheyne (Ed.), Comprehensive Biomaterials, Elsevier Ltd., Oxford. – 2011. – P. 75-100.

2. Hoevar M., Jenko M., Godec M., Drobne D. An overview of the influence of stainless-steel surface properties on bacterial adhesion. Materials and technology. – 2014. – Vol. 48(5). – P. 609-617.

3. Stadnyk I. Scientific and technological bases of processes and development of equipment for loosely mixing of dough: dissertation theses. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2013, 40 p., available at: [www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya\\_Stadnyk.pdf](http://www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya_Stadnyk.pdf).

4. Crawford R. J., Webb H. K., Truong V. K., Hasan J., Ivanova E. P. Advances in Colloid and Interface Science. – 2012. – Vol. 179. – P. 142-149.

5. Bloksma, A. Niemann, W. The effects of temperature on some rheological properties of wheat flour doughs. Journal of Texture studies. – 1975. vol. 6, no. 3, p. 343-361. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1975.tb01130.x>.

6. Whitehead K. A., Verran J. The Effect of Substratum Properties on the Survival of Attached Microorganisms on Inert Surfaces, In: H. C. Flemming, P. S. Murthy, R. Venkatesan, K. Cooksey (Eds.), Marine and Industrial Biofouling, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. – 2009. – P. 13-33.

## REFERENCES

1. Moriarty, T. F. Poulsson, A. H. C. Rochford, E. T. J. and Richards R. G. (2011), Bacterial Adhesion and Biomaterial Surfaces, In: P. Ducheyne (Ed.), Comprehensive Biomaterials, Elsevier Ltd., Oxford, p. 75-100.

2. Hoevar M., Jenko M., Godec M. and Drobne D. (2014), An overview of the influence of stainless-steel surface properties on bacterial adhesion. Materials and technology, vol. 48(5), p. 609-617.

3. Stadnyk I. (2013), Scientific and technological bases of processes and development of equipment for loosely mixing of dough: dissertation theses, Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 40 p., available at: [www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya\\_Stadnyk.pdf](http://www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya_Stadnyk.pdf).

4. Crawford R. J., Webb H. K., Truong V. K., Hasan J., Ivanova E. P. (2012), Advances in Colloid and Interface Science, vol. 179, p. 142-149.

5. Bloksma, A. Niemann, W. (1975), The effects of temperature on some rheological properties of wheat flour doughs, Journal of Texture studies, vol. 6, no. 3, p. 343-361. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1975.tb01130.x>.

6. Whitehead K. A., Verran J. (2009), The Effect of Substratum Properties on the Survival of Attached Microorganisms on Inert Surfaces, In: H. C. Flemming, P. S. Murthy, R. Venkatesan, K. Cooksey (Eds.), Marine and Industrial Biofouling, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 13-33.

Стаття надійшла до редакції 21 січня 2019 р.