

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

КРАВЧЕНЮК ХРИСТИНА ЮРІЇВНА

УДК 637.028

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ МИТТЯ ПОВЕРХОНЬ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МОЛОЧНОЇ ГАЛУЗІ**

03.00.20 «Біотехнологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Стадник Ігор Ярославович,
Тернопільський національний
технічний університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри обладнання
харчових технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Лопатько Костянтин Георгійович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри технології
конструкційних матеріалів
і матеріалознавства

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Боднарчук Оксана Василівна,
Інститут продовольчих ресурсів НААН,
завідувач відділу аналітичних досліджень
та якості харчової продукції

Захист відбудеться «10» грудня 2019 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.004.22 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «08» листопада 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Н. М. Слободянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ключовим завданням молочної галузі є виробництво безпечних та якісних молочних продуктів. Основний чинник, який знижує терміни зберігання й безпечність молочних продуктів, – це мікроорганізми. Кількісний і якісний склад мікрофлори продуктів залежить від дотримання умов виробництва й ефективної санітарної обробки технологічного обладнання. Згідно з даними ВООЗ, найсуттєвішим джерелом мікробного забруднення харчових продуктів під час виробництва є технологічне обладнання. Близько 40 % харчових отруень людей у світі викликають мікроорганізми, які надходять у сировину й готові продукти з технологічного обладнання. В основному мікрофлора виживає на поверхнях обладнання під час санобробки у так званих «мертвих зонах» (згини, з'єднання, прокладки, клапани, тріщини, подряпини) за рахунок формування біоплівки. У зв'язку з цим до поверхні технологічного обладнання, яке використовується в молочної промисловості, ставляться певні гігієнічні вимоги, особливо щодо санітарної обробки, рельєфу та шорсткості. Крім того, розвиток біоплівки сприяє зниженню ефективності санітарної обробки технологічного обладнання й тим самим підвищує мікробне забруднення молочних продуктів і скорочує терміни їх придатності.

Отже, проведення досліджень з вивчення процесу формування біоплівок бактеріями, які мають різні морфологічні та фізіологічні властивості, залежно від призначення технологічного і допоміжного обладнання з відповідною шорсткістю поверхні нержавіючої сталі є актуальними у молочної промисловості. Дослідження у такому напрямі дозволять визначити й науково обґрунтувати параметри санітарної обробки технологічного обладнання, спрямовані на максимальне зниження процесу мікробної адгезії, ефективну деградацію біоплівок та випуск якісної продукції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає науковому напрямку роботи кафедри обладнання харчових технологій та кафедри харчової біотехнології і хімії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за темою «Інтенсифікація технологічних процесів харчових виробництв та шляхи удосконалення якості готової продукції». Крім того, основні положення дисертації пов'язані з виконанням науково-дослідної роботи Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя з ПрАТ «Тернопільський молокозавод» (договір № 318-13 від 15 березня 2013 р.). Виконана робота відповідає Закону України від 12 жовтня 2010 р. № 2623-14 «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки».

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – розроблення технологічних режимів санітарної обробки обладнання, спрямованих на деградацію біоплівок і дослідження впливу параметрів шорсткості поверхні нержавіючої сталі на формування біоплівок мікроорганізмами.

Для досягнення поставленої мети визначено й вирішено такі завдання:

– дослідити залишкову мікрофлору на поверхнях технологічного й допоміжного обладнання молокопереробних підприємств і здатність її формувати біоплівки;

– дослідити процес плівкоутворення штамами бактерій *Escherichia coli* ATCC 25299 та *Enterococcus faecalis* ATCC 19433 на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні та в залежності від початкової їх кількості на поверхні;

– провести теоретичні та експериментальні дослідження процесу формування мікробних біоплівок на поверхні нержавіючої сталі з різною шорсткістю, в залежності від морфології мікроорганізмів та впливу режимів санітарної обробки;

– проаналізувати та розробити з впровадженням ефективного технологічного режиму санітарної обробки поверхні обладнання для видалення мікробних біоплівок;

– розробити математичне моделювання процесу утворення плівки на поверхнях різної шорсткості під впливом температури й кількості бактерій;

– розробити математичне моделювання процесу деградації біоплівки на поверхнях матеріальних трубопроводів, в залежності від гідродинаміки мийного засобу;

– провести імітаційне моделювання процесу руху потоку мийних засобів при використанні ежектора в циркуляційному контурі;

– обґрунтувати параметри процесу санітарної обробки на основі фізичних експериментів та імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження – параметри шорсткості поверхні нержавіючої сталі, температури середовища, часу інкубації, початкової кількості мікроорганізмів, морфологічного складу мікрофлори, формування та деградації біоплівок, технологічних режимів санітарної обробки.

Предмет дослідження – процес утворення та деградації бактеріальної плівки на поверхнях технологічного обладнання з нержавіючої сталі при технологічних режимах санітарної обробки.

Методи дослідження: методи фізичного експерименту, математичного та імітаційного моделювання; опрацювання експериментальних даних і розрахунки виконано із застосуванням сучасних інтегрованих систем MathCAD 15, КОМПАС – 3DV14, FlowVision, Microsoft Office Excel 2003; технічні (визначення шорсткості поверхні нержавіючої сталі); мікроскопічні (світлова та електронна мікроскопія процесу плівкоутворення); спектрофотометричні (густина біоплівок); мікробіологічні (кількісна характеристика та морфологія мікроорганізмів); статистичні.

Наукова новизна одержаних результатів. Науково обґрунтовано параметри шорсткості поверхні технологічного обладнання, яке проявляє протиадгезивні властивості та знижує процес плівкоутворення мікроорганізмами.

Встановлено закономірності процесу плівкоутворення на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні та виявлено, що за величини шорсткості R_a більше $0,95 \pm 0,092$ мкм формуються щільні біоплівки незалежно від морфологічного складу мікрофлори. Водночас адгезія та процес

плівкоутворення сповільнюються бактеріями *E. coli*, *E. faecalis* та *S. aureus* за шорсткості поверхні нержавіючої сталі 0,16 мкм.

Отримано подальший розвиток теоретичних положень, що розкривають суть мікробної адгезії до поверхні нержавіючої сталі. На основі запропонованої математичної моделі вперше розраховано процес формування і деградації з поверхонь обладнання біоплівки.

Встановлено динаміку зміни рідинного потоку за його циркуляції в транспортуючому трубопроводі та впливу ежекторного пристрою на процес санітарної обробки.

Отримано поведінку мікробіологічної плівки залежно від шорсткості поверхні нержавіючої сталі, параметрів навколишнього середовища та кількісного й морфологічного складу мікрофлори.

Обґрунтовано технологічний режим санітарної обробки обладнання, застосування якого дозволяє видаляти біоплівки та зменшувати мікробне обмінення устаткування.

Вперше розроблено спосіб визначення адгезивних властивостей нержавіючої сталі за показником густини сформованих біоплівки, який дозволяє встановити придатність сталі до ефективної санітарної обробки.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає у наданні науково-обґрунтованого аналізу утворення біоплівки в молочній промисловості з проведення санітарної обробки технологічного обладнання. Поглиблено розуміння процесу плівкоутворення мікроорганізмами на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні, залежно від фізіології, морфології бактерій та фізичних і хімічних властивостей поверхні. З цією метою запропоновано оцінювати протиадгезивні властивості нержавіючої сталі за показником щільності сформованих біоплівки *S. aureus*.

Визначено оптимальні параметри шорсткості, що мінімізують плівкоутворення, створюють мінімальні умови їх прикріплення. Такими параметрами є $R_a=0,16$ мкм. На основі результатів теоретичного й математичного моделювання процесу формування і деградації біоплівки на поверхні нержавіючої сталі з різною шорсткістю під час санітарної обробки, запропоновано використання ежекторного пристрою з 0,1 % мийним засобом «Ензимий», що дозволяють зменшення прикріплення мікроорганізмів до поверхні та зниження контамінації молочних продуктів.

Отримані результати досліджень пройшли успішну апробацію у виробничих умовах на молокопереробних підприємствах «ТОВ Бучацький сирзавод» та ПрАТ «Тернопільський молокозавод» Тернопільської області.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі при викладанні дисципліни «Мікробіологія молока і молочних продуктів» на кафедрі харчової біотехнології і хімії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та на кафедрі технології молока і молочних продуктів Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно проведено аналіз та узагальнення наукових даних із впливу поверхні нержавіючої сталі на процес

мікробної адгезії та плівкоутворення. Автором особисто проведено експерименти з вивчення впливу шорсткості поверхні нержавіючої сталі на адгезію та формування біоплівки мікроорганізмами, виділеними з технологічного обладнання молочної промисловості. Здійснено вибір предмета досліджень, запропоновано методи та засоби, математичні методи моделювання формування біоплівки на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні залежно від температури середовища, часу інкубації, початкової кількості мікроорганізмів та їх морфологічного складу. Статистично опрацьовано отримані результати, підготовлено матеріали досліджень у вигляді наукових статей і тез наукових доповідей, оформлено матеріали для отримання патентів, організовано промислову апробацію розробленого способу визначення протиадгезивних властивостей нержавіючої сталі. Планування напрямів роботи, наукові дослідження з питань мікробіології, обговорення результатів досліджень та підготовка їх до публікування здійснено за консультативної допомоги й підтримки доктора ветеринарних наук, професора М. Д. Кухтина та безпосередньої участі наукового керівника доктора технічних наук, професора І. Я. Стадника.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації було представлено та обговорено на: V Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні науково-технічні рішення в харчовій промисловості» (м. Львів, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Стан і перспективи харчової науки та промисловості» (м. Тернопіль, 2015 р.); IX Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (м. Тернопіль, 2016 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2016 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (м. Харків, 2017 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Стан і перспективи харчової науки та промисловості» (м. Тернопіль, 2017 р.); II Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (м. Тернопіль, 2019 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 18 наукових працях, з яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у науковому виданні іншої держави, стаття в інших наукових виданнях, 2 патенти на корисну модель, 8 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 239 сторінок. Робота містить 19 таблиць та 75 рисунків. Список використаних джерел налічує 174 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими темами, наукове та практичне значення одержаних результатів, сформовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, що виносяться на захист, визначено особистий внесок здобувача, подано перелік наукових конференцій, де було представлено аспекти дисертації, та список публікацій, в яких висвітлено її основні результати.

У першому розділі «**Механізми формування мікробних біоплівки на поверхні технологічного обладнання**» проаналізовано відомі теоретичні й експериментальні дослідження, пов'язані з аналізом адгезії бактерій до поверхні технологічного обладнання. Відзначено, 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; початкової кількості мікроорганізмів, їх розмірів, температури і рН навколишнього середовища. Розглянуто три теорії мікробної адгезії до поверхні: термодинамічну, DLVO (Deryaguin – Landau – Verwey – Overbeek) теорію та теорію розширеного XDLVO. Наведено схематичну модель формування й росту біоплівки й подано основні чинники, які впливають на адгезію мікроорганізмів до поверхні технологічного обладнання у молочній промисловості з їх повною характеристикою.

Велику роль у розвитку взаємодії поверхні обладнання з утворенням біоплівки відіграли роботи, засновані на фундаментальних працях із реології П. А. Ребіндера, Б. А. Ніколаєва, Р. J. Bremer, D. Drobne, M. Jenko, M. Godes, В. Н. Нігора та ін.

Проведено класифікацію поверхонь згідно з технологічним обладнанням із виробничого циклу випуску молочної продукції, наведено способи й методи обробки поверхні з нержавіючої сталі згідно з їх шорсткістю, здійснено порівняльний аналіз. Дано стислий опис впливу прикріплених бактерій до поверхні нержавіючої сталі, що формують біоплівку, матрикс і спричиняють корозію матеріалу, мікробне забруднення харчових продуктів та економічні витрати. Проведено аналіз існуючих способів санітарної обробки обладнання та наведено блок-схему прийняття рішень методологічного підходу до оптимізованого синтезу миття машини.

Враховуючи недостатній рівень науково-технічного розгляду проблеми удосконалення миття малодоступних поверхонь обладнання молочної галузі, ціллю роботи є обґрунтування технологічних параметрів при проектуванні нових методів і засобів санітарної обробки заданої якості.

У другому розділі «**Об'єкт, предмет, матеріали та методи досліджень**» наведено загальний план проведення теоретичних та експериментальних досліджень, які проведено в чотири етапи. Перший – вивчення мікрофлори технологічного обладнання й готової продукції, чутливість виділених мікроорганізмів до дезінфікуючих засобів санітарної обробки, здатність мікроорганізмів формувати біоплівки на поверхнях нержавіючої сталі

з різною шорсткістю та залежно від їх початкової кількості на обладнанні. Другий – теоретичне та експериментальне моделювання процесу формування й деградації мікробних біоплівки на поверхні обладнання з різною шорсткістю поверхні під час санітарної обробки. Третій – узагальнення процесу формування й деградації біоплівки на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні в трубопроводах за різних технологічних режимів санітарної обробки. Четвертий – математичне моделювання процесу плівкоутворення й деградації мікробних біоплівки на поверхнях обладнання з використанням ежекторного пристрою.

Для дослідження використано пластинки з нержавіючої корозійно-стійкої нікель-хромової аустенітної сталі марки AISI 321 (стандарт Американського інституту сталі та сплавів) розміром 30×30 мм і товщиною 1,2 мм, з шорсткістю поверхні $R_a=2,68\pm0,014$ мкм; $0,95\pm0,092$; $0,63\pm0,087$; $0,30\pm0,065$; $0,25\pm0,035$; $0,24\pm0,026$; $0,16\pm0,018$ мкм, які зображено на рис. 1.

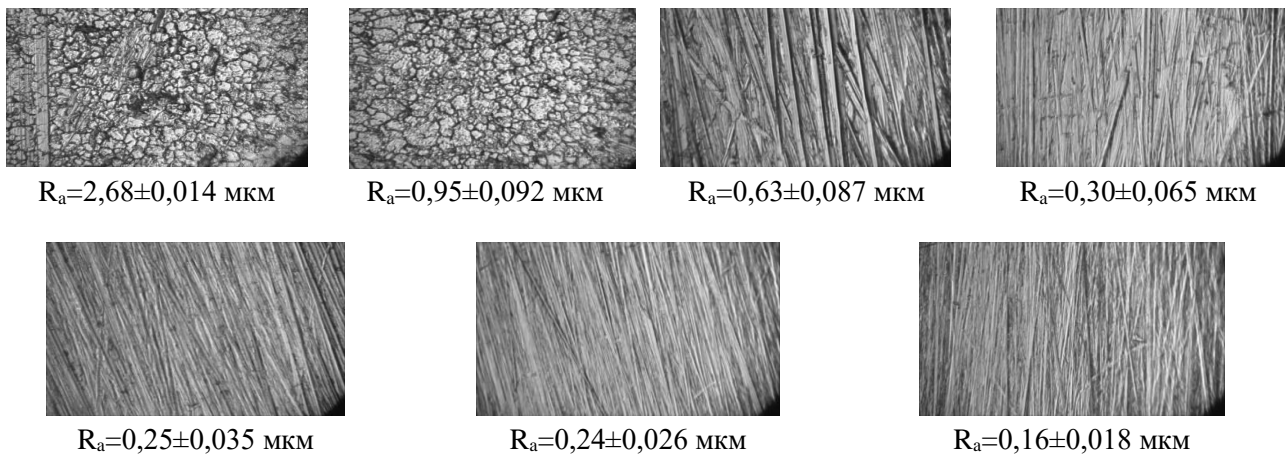


Рис. 1. Фотографії пластинок із нержавіючої сталі з різною шорсткістю отримані з допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4У4.2 ($\times 1500$ разів)

Електронно-мікроскопічні дослідження процесу формування біоплівки на нержавіючій сталі проведено на електронному растровому мікроскопі (РЕМ 106 И, Україна) при збільшенні від 2000 до 5000 разів, візуальний огляд мікроорганізмів у западинах чи на виступах шорсткості проводили мікроінтерферометром МІІІ-4У4.2 при збільшенні 1500 разів. Оптичну густину визначено спектрофотометрично за довжини хвилі 570 нм на фотометрі КФК-3 (Україна). Міру чистоти технологічного обладнання технологічної лінії з виробництва молока питного і кисломолочних продуктів після санітарної обробки визначено за допомогою люменометра 3M Clean-Trace (3M, США). Опрацювання експериментальних даних і графічне оформлення роботи здійснено за допомогою комп'ютера з використанням програмного забезпечення OriginPro 2015, SOLIDWORKS 2016, КОМПАС 3DV15, MathCad, Microsoft Office Excel 2003, програмного комплексу FlowVision. Для дослідження процесів, які впливають на деградацію плівки змонтовано експериментальну установку (рис. 2, 3).

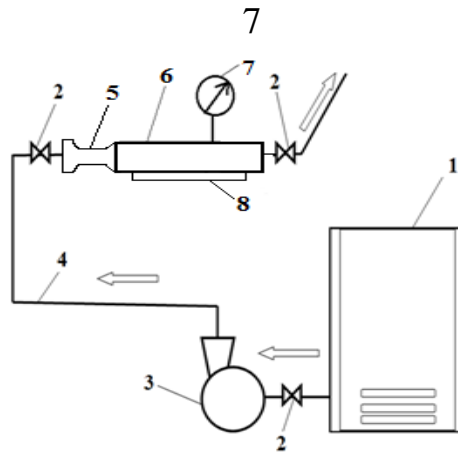


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – ємність з підігрівачем для води; 2 – кран; 3 – насос; 4 – трубопровід; 5 – ежектор; 6 – труба з магнітом; 7 – манометр



Рис. 3. Експериментальна установка: 1 – ємність з підігрівачем для води; 2 – трубопровід; 3 – насос; 4 – кран; 5 – труба з магнітом; 6 – манометр; 7 – ежектор

У третьому розділі «Теоретичні та експериментальні дослідження процесу формування біоплівки на поверхнях технологічного обладнання» наведено фізичну суть механізму формування, характер розвитку біоплівки, визначено обміненія мікроорганізмами поверхні технологічного обладнання та молочних продуктів на молокопереробних підприємствах. Встановлено, що з молока-сировини, технологічного обладнання після санітарної обробки та з готової молочної продукції виділяються мікроорганізмами родів *Bacillus spp.* і *Lactobacillus spp.* в 100–37,1% випадків. Бактерії родів *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Pseudomonas* і родини *Enterobacteriaceae* виділяються значно рідше. Аналіз електронно-мікроскопічних зображень показав, що мікроорганізми, які перебувають у біоплівці, мають вигляд суцільних кластерів. Визначено чутливість бактерій, сформованих у біоплівки до шести дезінфікуючих засобів, що використовуються для санітарної обробки поверхні обладнання на молокопереробних підприємствах. Контролем був метод визначення чутливості планктонних бактерій до даних засобів у концентрації та за температури згідно з інструкцією виробника.

Вивчено процес формування біоплівки з різною шорсткістю протягом певного часу на паличкоподібних (*E. coli*) і кокових (*E. faecalis*) бактеріях. Оптична густина змитих спиртових розчинів з поверхонь пластин нержавіючої сталі, на яких сформована біоплівка *E. coli*, залежала від часу вирощування та шорсткості поверхні пластин. За шість годин інкубації *E. coli* величина оптичної густини спиртових розчинів з пластинок із шорсткістю від $0,95 \pm 0,092$ до $0,63 \pm 0,087$ мкм складала від $0,258 \pm 0,002$ до $0,221 \pm 0,002$ од. та поступово зменшувалася в 1,9–1,6 раза ($p \leq 0,05$) до $0,140$ – $0,130$ од. у пластинок із шорсткістю від $0,30 \pm 0,065$ до $0,16 \pm 0,018$ мкм. Це дає підставу вважати, що за шорсткості $0,5$ мкм проходить менша адгезія і формування біоплівки кишковою паличкою. Упродовж наступних 12 год інкубації (24 год) процес плівкоутворення завершився на пластинах сталі з шорсткістю від $0,95 \pm 0,092$ до $0,63 \pm 0,087$ мкм, а на поверхнях із шорсткістю від $0,30 \pm 0,065$ до $0,16 \pm 0,018$ мкм практично був на завершальній стадії.

Результати досліджень з визначення оптичної густини сформованих біоплівок *E. faecalis* упродовж 6 год, 12 та 24 год на нержавіючій сталі з різною шорсткістю встановили, що чим більш контамінована поверхня мікроорганізмами, тим швидше проходить процес плівкоутворення і формування щільних біоплівок. Встановлено, що на процес формування біоплівок *E. coli* та *E. faecalis* крім шорсткості поверхні значний вплив має початкова кількість бактерій. Виявлено, що за тих самих умов біоплівка *E. coli* мала меншу оптичну густина порівняно з *E. faecalis*. Процес плівкоутворення залежить від розмірів бактерій, величина *E. faecalis* в два рази менша, ніж *E. coli*. Це дозволяє швидше заповнити западини шорсткості й формувати щільнішу біоплівку з малою шорсткістю протягом короткого періоду часу. Виявлено, що чим контамінованіша поверхня мікроорганізмами, тим швидше проходить процес плівкоутворення і формування щільних біоплівок.

Проведено математико-статистичне опрацювання результатів досліджень методом регресійно-кореляційного аналізу. У якості параметра оптимізації використано зміну інтенсивності розвитку Z та оптичну густина Y за факторами часу τ і шорсткості r для різних температурних діапазонів T , °C та початкової кількості бактерій k , зведених в табл. 1 та 2. Рівняння регресії для бактерій *E. coli* та бактерій *E. faecalis* буде:

$$Y_{k,i} = y_0 + y_1 r_k + y_2 \tau_i + y_3 r_k \tau_i + y_4 (r_k)^2 + y_5 (\tau_i)^2$$

$$Z_{k,i} = z_0 + z_1 r_k + z_2 \tau_i + z_3 r_k \tau_i + z_4 (r_k)^2 + z_5 (\tau_i)^2$$

Таблиця 1

Зміна оптичної густини для бактерій *E. coli* від параметрів T і k

Y, r \ T, k	$37^* < 1$	$37^* 2-10$	$37^* > 50$	$25^* 2-10$	$17^* 2-10$
y_0	-0,049	-0,181	-0,169	-0,027	0,08
y_1	0,171	0,281	0,217	0,151	-0,028
y_2	0,014	0,063	0,08	0,018	$3,239 \cdot 10^{-3}$
y_3	$9,522 \cdot 10^{-3}$	$4,579 \cdot 10^{-3}$	$8,186 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,01
y_4	-0,055	-0,084	-0,058	-0,054	$5,657 \cdot 10^{-3}$
y_5	$1,671 \cdot 10^{-3}$	$3,785 \cdot 10^{-4}$	$-2,485 \cdot 10^{-4}$	$1,237 \cdot 10^{-3}$	$7,219 \cdot 10^{-4}$

Зміна оптичної густини для бактерій *E. faecalis* від параметрів T і k

T, k Y, r	$37^* <1$	$37^* 2-10$	$37^* >50$	$25^* 2-10$	$17^* 2-10$
y_0	-0,058	-0,177	-0,161	-0,065	0,074
y_1	0,189	0,245	0,161	0,143	-0,028
y_2	0,016	0,069	0,092	0,038	$5,594 \cdot 10^{-3}$
y_3	0,011	$5,343 \cdot 10^{-3}$	$8,453 \cdot 10^{-3}$	$6,702 \cdot 10^{-3}$	0,012
y_4	-0,061	-0,068	-0,034	-0,047	$4,798 \cdot 10^{-3}$
y_5	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$1,715 \cdot 10^{-4}$	$-6,781 \cdot 10^{-4}$	$9,417 \cdot 10^{-4}$	$7,161 \cdot 10^{-4}$

Поверхня відгуку *E. coli* та *E. faecalis* наведено на рис. 4 і 5.

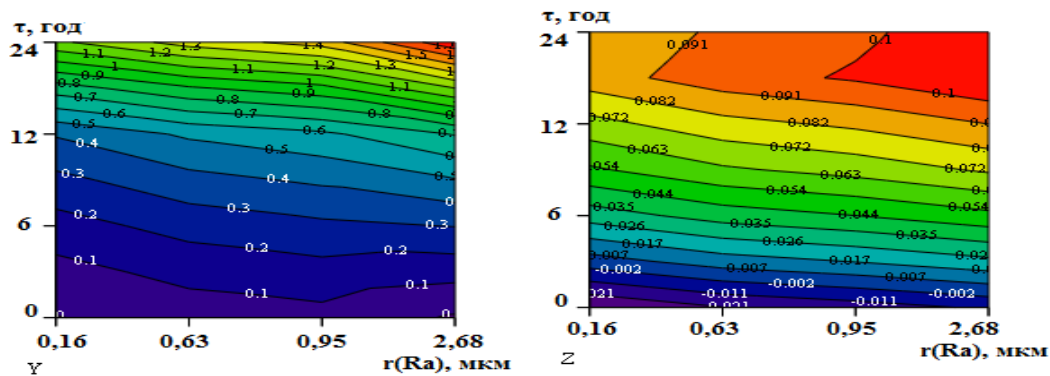


Рис. 4. Діаграми зміни оптичної густини (Y) та інтенсивності розвитку (Z) *E. coli* від шорсткості поверхні та часу інкубації в процесі формування біоплівки за температури $+25 \pm 1$ °C з початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис./см² площі

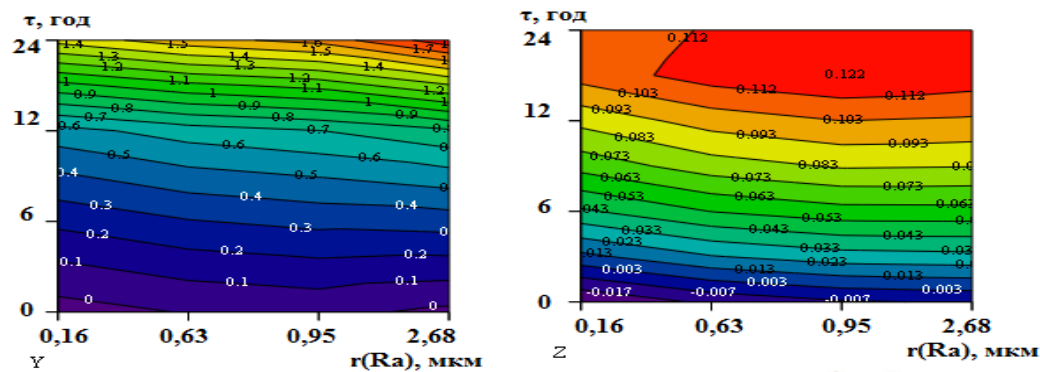


Рис. 5. Діаграми зміни оптичної густини (Y) та інтенсивності розвитку (Z) *E. faecalis* від шорсткості поверхні та часу інкубації в процесі формування біоплівки за температури $+25 \pm 1$ °C з початковою кількістю мікробних клітин до 2–10 тис./см² площі

З рис. 4 і 5 бачимо, що швидкість зростання *E. faecalis* інтенсивніша, оскільки відбувається заповнення западин шорсткості з 2,68 до 0,63 мкм на відміну від *E. coli* до 0,95 мкм.

У четвертому розділі «Теоретичне та експериментальне моделювання процесу деградації біоплівок» розглянуто процес деградації біоплівки,

шляхом відривання її від поверхні мийними засобами, де певні зусилля йдуть на подолання гідродинамічних опорів та внутрішніх напруг. Встановлено, що на величину площі фактичного контакту впливає багато факторів: нормальний тиск, склад мийних засобів, швидкість потоку, а також зовнішні чинники – температура, напруженість, тривалість утворення біоплівки, швидкість зростання зусилля відриву. Обґрунтовано гідродинамічні параметри потоку мийного засобу при використанні ежекторного пристрою, які повинні дотримуватися постійної швидкості й тиску при можливості регулювання одного із параметрів при незмінності всіх інших.

Для дослідження динаміки руху мийного засобу в лабораторній установці (див. рис. 2, 3) використано математичну модель турбулентного нестисливого потоку, яка базується на застосуванні задач рівняння Нав'є-Стокса, що дає змогу розрахувати розподіл швидкості й тиску вздовж трубопроводу. Дослідження динаміки руху рідинного потоку в трубопроводі із складною конфігурацією внутрішньої поверхні проведено із використанням програмного комплексу математичного моделювання тривимірних потоків рідин FlowVision, Flow3D. Рівняння переносу турбулентної дисипації ε :

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho\vartheta\varepsilon) = \nabla((\mu + \mu\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla\varepsilon) + c_1\frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1)$$

де Δ – оператор Лапласа; C_μ – коефіцієнт, який приймається рівним $C_\mu=0,09$; G – параметр; B_ε – коефіцієнт, який дорівнює 1,3; C_1 – коефіцієнт, який дорівнює 1,44; C_2 – коефіцієнт, який дорівнює 1,92; μ – молекулярна динамічна в'язкість; ϑ – векторне поле швидкостей; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії.

Теоретичні та експериментальні дослідження встановили, що у трубопроводі відбуваються значні втрати тиску до 500 Па та швидкості до 0,3 м/с у пограничному шарі, що впливає на гідродинаміку потоку мийного засобу.

Проведено математичне моделювання адгезії бактеріальної плівки в транспортній системі, яке умовно поділено на два випадки: змивання бактеріальної плівки проходить по поверхні коліна, і коли повне відносне ковзання відсутнє (рис. 6). Приймаємо, що утворена плівка на поверхні коліна заданої кількості при транспортуванні не деформується, а її швидкість ковзання $V=\text{const}$. Масою цієї плівки та її відцентровою силою нехтуємо. За необхідності подолання сили адгезії F_{ad} маємо $s_2 = s_1 - F_{ad}$. Звідси

$$F_{ad} = s_2 - s_1. \quad (2)$$

На схемі da і α – відповідно елементарний і повний кути охоплення, s і $s + ds$ – зтягування (натяг) плівки. Тоді елементарна сила адгезії dF_{ad} дорівнюватиме

$$dF_{ad} = (s + ds) - s = ds \text{ і } dF_{ad}fdP, \quad (3)$$

де dP – елементарна сила притискання, яка визначається за відомих сил s та $s+ds$, f – коефіцієнта тертя. Якщо знехтувати величинами другого порядку і замінити паралелограм ромбом зі сторонами s , то

$$dP = 2ss\text{ind}\alpha/2 = 2sda/2 = sda. \quad (4)$$

Тоді з врахуванням рівнянь (3), маємо

$$ds/s = f d\alpha. \quad (5)$$

Інтегруванням лівої і правої частин умови (5) у межах від s_1 до s_2 і, відповідно, від нуля до α , отримаємо

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{s} = \int_0^\alpha f d\alpha \ln \frac{s_2}{s_1} = f\alpha. \quad (6)$$

Звідси

$$s_2 = s_1 e^{af}. \quad (7)$$

Тоді з врахуванням умови (1) записуємо

$$F_{ad} = s_1 (e^{af} - 1). \quad (8)$$

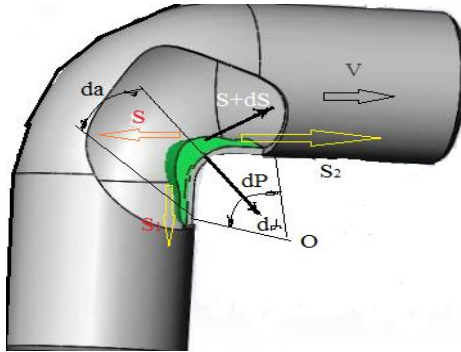


Рис. 6. Схема для визначення сили адгезії утвореної плівки

За умови дії потоку рідини сила адгезії частково зменшується за рахунок дії відцентрових сил. З урахуванням останніх співвідношень між силовими параметрами, набувають вид:

$$s_1 = F_{ad} \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} g, \quad (9)$$

$$s_2 = \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} qv. \quad (10)$$

Тоді

$$F_{ad} = (s_1 - \frac{gv^2}{g}) \frac{e^{f\alpha} - 1}{e^{f\alpha}}, \quad (11)$$

де v – колова швидкість, м/с; q – маса плівки, кг/м; g – прискорення вільного падіння, м/с².

У першому наближенні звернемося до формули (8), в якій функція відгуку представлена силою адгезії F_{ad} , а до числа факторів впливу віднесемо натяг s_1 (x_1) плівки, кут охоплення α (x_2) і коефіцієнт тертя $f_{ТЗ}$ (x_3). Орієнтиром при виборі значення s_1 має бути величина s_{1max} , яка визначається через площу поперечного перерізу плівки й допустиме напруження $[\sigma_0]$ у його навантаженні на розтягування.

Наведені теоретичні залежності у своїй сукупності дозволяють здійснити розрахункові дворівневі експерименти в системах із кількісним оцінюванням впливів різних факторів на вихідну величину F_{ad} .

Рівняння регресії має вигляд:

$$y = 5183,398 + 575,93x_1 + 6874,96x_2 + 1365,5x_3 + 97,21x_2 + 151,72x_1x_3 + 467,7x_2x_3.$$

Встановлено, що ступінь обробки поверхні залежить від гідродинамічного стану системи, її дисипативних властивостей, рівня і ступеня

локалізації зони введення енергії, кінематичних параметрів входження в контакт рідинної фази з бактеріальною плівкою на шорсткій поверхні матеріалопроводу.

Порівняння сукупності енергетичних впливів з енергією утворення міжфазної поверхні вказує на доцільність локалізації енерговведення в зону такого утворення за рахунок підвищення швидкості контактування мийного потоку з плівковою фазою. При взаємодії рідинного m_p (кг/с) потоку та мікробіологічною плівкою з фіксованими початковими швидкостями w_n і w_p за ізобарного процесу на основі закону збереження кількості руху отримано швидкість рідинної суміші $w_{\text{сум}} = \frac{m_p w_p + m_n w_n}{m_p + m_n}$.

Потужності кінетичних енергій потоків становлять $N_p = \frac{m_p}{2} w_p^2$; $N_n = \frac{m_n}{2} w_n^2$; $N_{\text{зм}} = \frac{(m_p w_p + m_n w_n)^2}{2(m_p + m_n)}$, а втрата кінетичної енергії на взаємодію потоків $\Delta N = \frac{m_p m_n}{2(m_p + m_n)} (w_p - w_n)^2$.

Наведена різниця потужностей вхідних і вихідних потоків у відповідності з законом збереження енергії визначає, у тому числі рівень дисперсності змитої фази у рідинній і рівень дисипативних втрат. На загальний результат, як бачимо, впливають масові потоки й різниця їх швидкостей, що сприяє деградації біоплівки паличкоподібних і кокових форм бактерій.

У п'ятому розділі «Узагальнення результатів досліджень процесу деградації мікробних біоплівок за різних технологічних режимів санітарної обробки поверхонь обладнання» проведено визначення оптимальних режимів експлуатації ежектора транспортної системи транспортування дисперсного середовища, що ґрунтується на розробленні ежектора з визначенням рівня варіювання чинників і побудови математичної моделі й оцінювання її адекватності експерименту (рис. 7).

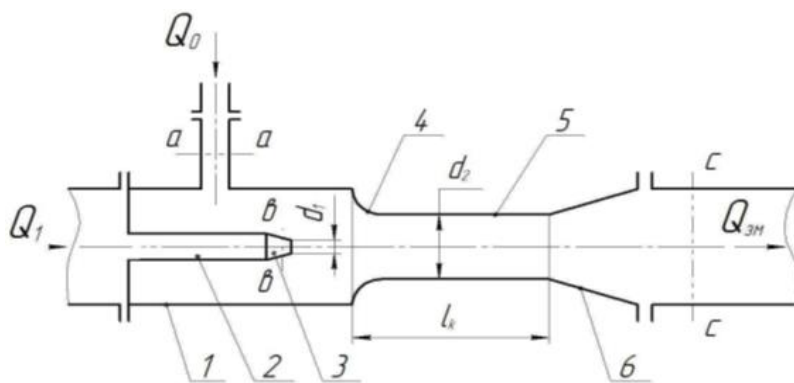


Рис. 7. Схема ежектора: 1 – приймальна камера; 2 – підведення робочого потоку; 3 – робоча насадка; 4 – вхідна ділянка камери змішування; 5 – камера змішування; 6 – дифузор

Встановлено основні конструктивні параметри, які приймаються в діапазоні: діаметр робочої насадки від 3 до 25 мм, співвідношення площ

перерізів від 1,5 до 20. Вибір цих параметрів здійснено, виходячи з призначення ежектора, типу обладнання, конструкції.

Проведено синтез інтегрованої моделі ежектора для санітарної обробки трубопроводів на основі механіки суцільних середовищ у просторі ПП FlowVision з основними його геометричними параметрами (рис. 8). Припущенням дослідної моделі FlowVision приймалося, що ежектор працює при заданому тиску на виході з дифузора. Ступінь розширення дифузора f , розглядалась як параметр, що суттєво впливає на режими роботи ежектора. При моделюванні ежектора також прийнято допущення про одномірність потоку. Визначено коефіцієнт ежекції $n = \frac{p_2^* q(\lambda_2)}{p_1^* q(\lambda_1) \alpha \sqrt{\theta}}$, де σ_2, σ_1 – коефіцієнти відновлення тиску відповідно в активному і пасивному соплах $p_1^* = p^* \sigma_1$ і $p_2^* = p_n^* \sigma_2$.

Встановлено, що при швидкості подавання води 5 м/с і мийного засобу – 20 м/с утворення рідинної суміші стабілізується у короткий термін і, на виході з центрального отвору ежектора, швидкість становить 20,0 м/с. Після змішування компонентів у конфузійній частині тиск зменшується і, на відстані 13 мм від місця подавання компонентів, становить 3,8 МПа. На виході з ежекційного пристрою тиск суміші, в середньому, становить 3,2 МПа.

Порівнюючи концентрацію на початку ежектування й за усталеного процесу (рис. 8), можна простежити кінетику вирівнювання. При виході на усталений режим, що досягається через 0,01 с після початку роботи ежектора, величина концентрації мийного засобу у суміші становить 0,82 %.

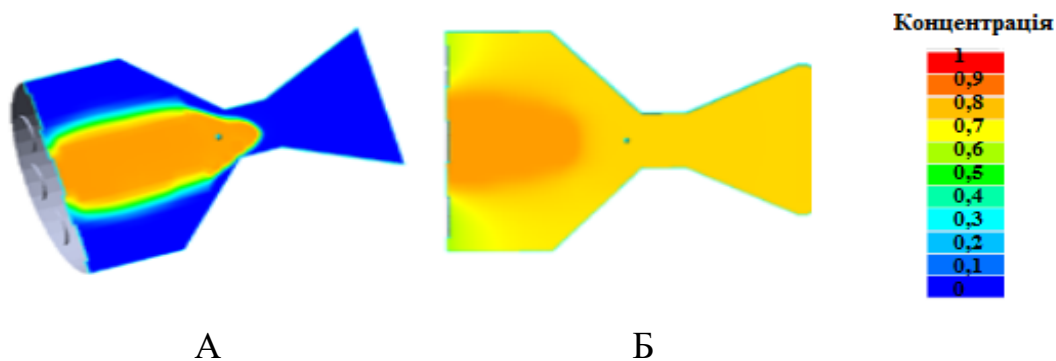


Рис. 8. Розподіл концентрації мийного засобу в ежекторі: а – початок роботи; б – вихід на усталений режим

Динамічну в'язкість утвореної суміші визначено для кожного дискретного процесу санобробки окремо, без ежектора та з ежектором. Проведено математичне моделювання визначення динамічної в'язкості утвореної суміші біоплівки і мийного засобу після проведення санобробки з урахуванням часу при сталому тиску і швидкості течії у пограничному шарі. Апроксимацію експериментальних даних наведено графічно й у вигляді регресійних рівнянь (рис. 9). Загальна математична модель зміни в'язкості утвореної суміші з різною шорсткістю поверхні за відповідний час при заданих умовах процесу миття за використання ежектора має вигляд

$$\eta(R_a, \tau) = \tau^2(-0,00192R_a^2 + 0,0057R_a + 0,0004) + \tau(0,732R_a^2 - 0,2289R_a).$$

Графічне зображення процесу наведено на рис. 10.

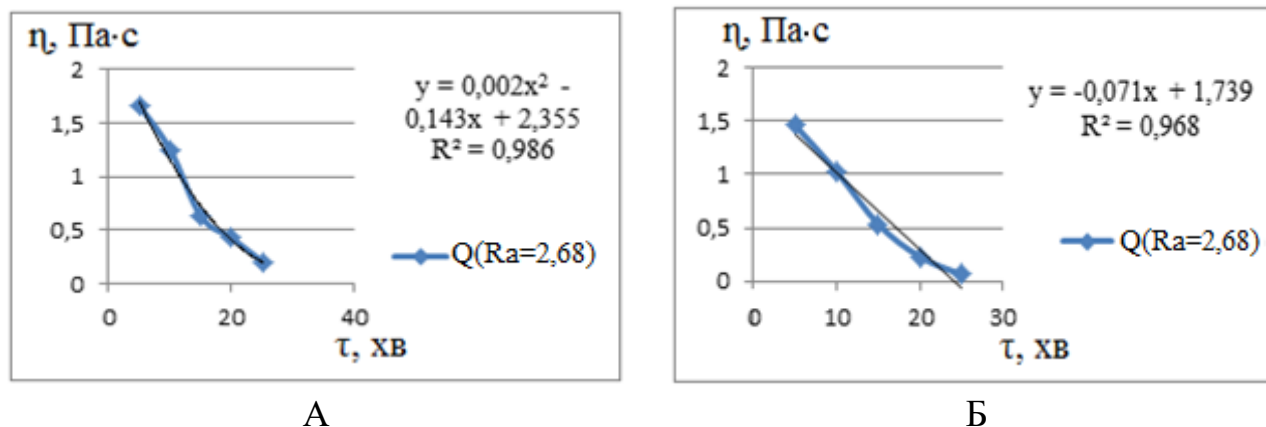


Рис. 9. Зміна динамічної в'язкості суміші з часом при $Ra=2,68$ мкм:
а) для *E. faecalis*; б) для *E. coli*

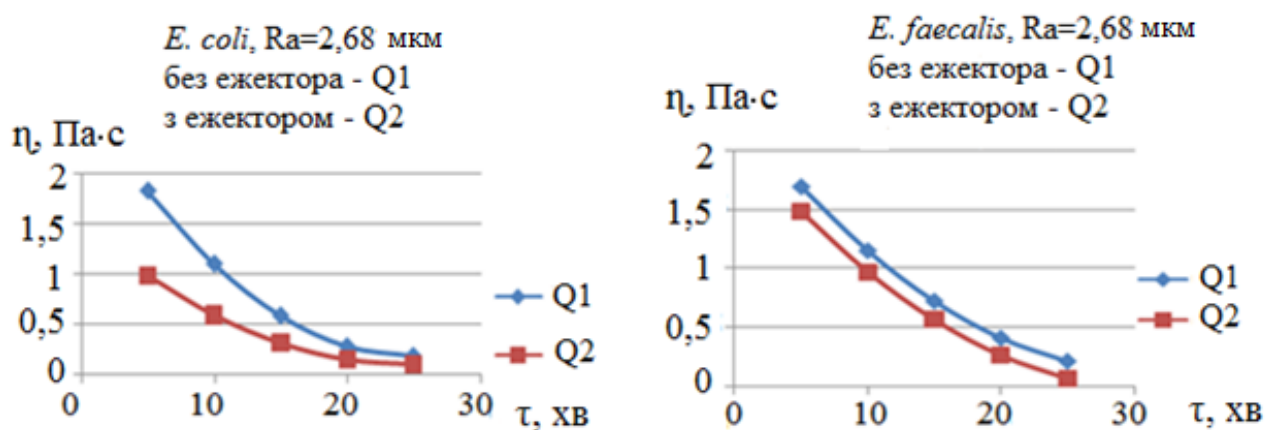


Рис. 10. Зміна динамічної в'язкості суміші з часом

Дослідження вказують на те, що найефективніше відбувається деградація біоплівки за температури розчину ензиму *Savinase®Evity 16L* від 50 до 60 °С. За цих температур динамічна в'язкість знижується, в середньому в 19 разів, порівняно з контролем до обробки. Водночас проведення санітарної обробки з використанням ензиму призвела до видалення білково-жирових відкладень із технологічної лінії та зниження показника RLU до $5,1 \pm 0,2$ од. Використання запропонованого ежектора забезпечує підвищення продуктивності до 0,8 %; зменшення експлуатаційних витрат – на 1,2 %; зменшення витрат на оплату праці оператора – на 3 %. Економічний ефект від упровадження розробленої конструкції становить 13523,94 грн з терміном окупності 3 місяці.

ВИСНОВКИ

У дисертації на основі експериментальних даних науково обґрунтовано здатність мікроорганізмів формувати біоплівку та її деградації з шорсткої поверхні нержавіючої сталі технологічного обладнання відповідно до запропонованих технологічних режимів санітарної обробки з використанням ежекційного пристрою та ензимів.

1. Встановлено, що з технологічного обладнання після санітарної обробки та з готової молочної продукції виділяються мікроорганізми (*Bacillus spp.*, *Lactobacillus spp.*, *Staphylococcus*, *Enterococcus* та ін.), що утворюють біоплівки високої та середньої щільності. Це вказує на те, що під час проведення санітарної обробки технологічного обладнання на його поверхнях виживають бактерії, сформовані у біоплівки.

2. Обґрунтовано, що процес формування біоплівки *E. coli* на нержавіючій сталі залежить від шорсткості поверхні та початкової кількості мікробних клітин. Оптична густина сформованих біоплівок за початкової кількості клітин *E. coli* до 1 тис. на см² площі була в середньому в 1,8–2,2 рази ($p \leq 0,05$) нижчою порівняно з біоплівкою, сформованою на поверхнях із початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис. та 20–50 тис. на см² площі сталі. Це вказує, що для попередження формування біоплівок високої щільності необхідно проводити якісну санітарну обробку технологічного обладнання.

3. Досліджено, що на поверхні нержавіючої сталі з шорсткістю $2,68 \pm 0,014$ мкм процес плівкоутворення у *E. coli* та *S. aureus* проходив однаково та не залежав від розмірів бактерій. На поверхні з шорсткістю $0,95 \pm 0,092$ мкм процес плівкоутворення у *S. aureus* проходив в 1,3 рази інтенсивніше, ніж у *E. coli*. За шорсткості поверхні $0,63 \pm 0,087$ мкм інтенсивність плівкоутворення *S. aureus* була в середньому в 1,4 рази швидша, ніж у *E. coli*. Водночас, за шорсткості $0,16 \pm 0,018$ мкм процес плівкоутворення проходив однаково у *S. aureus* і *E. coli*, але біоплівки були нижчої щільності порівняно з такими, які формувалися за шорсткості $0,63 \pm 0,087$ мкм.

4. Математичне моделювання встановило, що кількість бактерій *E. coli* найбільшого значення набуває при шорсткості поверхні 2,68 мкм після 20 год інкубації. При цьому швидкість розвитку *E. coli* найінтенсивніше зростає за величини шорсткості між 0,95 і 2,68 мкм та часу, починаючи після 10-годинної інкубації за температури $+37 \pm 1$ °C. Отже, спочатку адгезія та інтенсивний процес формування біоплівки *E. coli* проходить у западинах великих шорсткостей 2,68–0,95 мкм і поступово заповнює западини меншої шорсткості 0,63–0,16 мкм. Процес плівкоутворення у *E. faecalis* за температури $+37 \pm 1$ °C на поверхні з різною шорсткістю проходив інтенсивніше порівняно з *E. coli*.

5. Проведено дослідження динаміки руху рідини моделлю турбулентного нестисливого потоку, яка базується на основі механіки суцільних середовищ із застосуванням рівняння Нав'є-Стокса у просторі ПП Flow Vision. Теоретично визначено поділ турбулентної зони й перехідні швидкості руху у пограничному шарі від 0,2 до 0,6 м/с при тиску 0,2 МПа.

6. Теоретично змодельовано, що процес деградації біоплівок з нержавіючої сталі під час санітарної обробки найважче буде проходити за шорсткості поверхні 2,68–0,95 мкм. Це пов'язано з тим, що у западинах шорсткості можуть залишатися як кокові, так паличкоподібні бактерії, які сформовані у біоплівки. Водночас, за шорсткості поверхні сталі 0,63–0,16 мкм утворені біоплівки менш захищені западинами шорсткості й процес деградації буде проходити швидше.

7. Перспективним засобом інтенсифікації процесу в рідинних системах є переведення їх у режими перехідних процесів з метою перерозподілу енергетичних потоків у зони деградації плівки з поверхні, генерації пульсаційних впливів. Порівняльна сукупність енергетичних впливів з енергією утворення міжфазної поверхні вказує на доцільність локалізації енерговведення в зону такого утворення за рахунок підвищення швидкості контактування мийного потоку в пограничному шарі при швидкості 0,5 м/с з біоплівковою фазою.

8. Проведено визначення силових і кінематичних співвідношень стосовно горизонтальних і вертикальних орієнтованих циркуляційних контурів і стосовно бактеріальних плівкових ділянок з криволінійними трасами трубопроводів. Розроблено теоретичну модель взаємодії рідинних потоків з оцінюванням дисипативних енергетичних втрат у структурі енергетичних потоків.

9. Проведено математичне й комп'ютерне моделювання впливу конструктивних і технологічних параметрів ежекційного пристрою на процес санітарної обробки трубопроводів. Встановлено, що на вході в ежекційний пристрій тиск становить 0,367 МПа, а після змішування компонентів у конфузорній частині тиск зменшується і, на відстані 13 мм від місця подачі компонентів, становить 0,38 МПа. На виході з ежекційного пристрою тиск суміші, в середньому, становить 0,32 МПа. За таких умов санітарна обробка триває до 20 хв, що підтверджується дослідними даними показників динамічної в'язкості $\eta=0,0135-0,214 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

10. Розроблено спосіб визначення протиадгезивних властивостей нержавіючої сталі за показником густини сформованих біоплівок, який дозволяє встановити придатність сталі до ефективної санітарної обробки. Досліджено, що в'язкість біоплівки зменшується зі зростанням часу санобробки до 25 хв при швидкості 0,5 м/с у межах $\eta=0,1235-0,148 \text{ Па}\cdot\text{с}$ за тиску $P_n=0,20 \text{ МПа}$. Особливо значний вплив на в'язкість біоплівки чинить зміна швидкості деформацій зсуву при використанні ежектора. Експериментальні дослідження динамічної в'язкості рідини підтвердили адекватність запропонованої математичної моделі розглянутого процесу деградації біоплівки. Розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 10 %.

11. Запропонований технологічний режим санітарної обробки обладнання з використанням ежекторного пристрою та використанням ензиму *Savinase®Evity 16L* дозволяє руйнувати біоплівки, зменшувати кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів у 4,2–7,3 раза та знижувати показники люменометра в 25,1–40,3 раза у змивах з обладнання порівняно із стандартною санітарною обробкою.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кухтин М. Д., Покотило О. С., Карпик Г. В., Кравченко Х. Ю., Шинкарук О. Ю. Зміни вільних жирних кислот та жирнокислотного складу

молока під впливом психротрофних мікроорганізмів. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. 2015. № 1 (4). Т. 17. С. 50–55. *(Здобувачем визначено зміни хімічного складу молока під впливом мікрофлори технологічного обладнання та проведено аналіз отриманих результатів).*

2. **Кравченко Х. Ю.**, Кухтин М. Д. Формування біоплівки на нержавіючій сталі AISI 321, залежно від шорсткості поверхні та початкової кількості *E. coli*. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. 2017. № 75. Т. 19. С. 144–148. *(Здобувачем досліджено процес формування біоплівки *E. coli* на нержавіючій сталі з різною шорсткістю залежно від їх початкової кількості поверхні та проведено аналіз отриманих результатів).*

3. **Кравченко Х. Ю.**, Стадник І. Я., Мольченко С. М., Демидов І. М. Аналітична модель деградації бактеріальної плівки на поверхні трубопроводу із нержавіючої сталі. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. № 15. С. 25–30. *(Здобувачем розроблено аналітичну модель деградації бактеріальної плівки на поверхні трубопроводу з нержавіючої сталі).*

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

4. Kukhtyn M., Berhilevych O., **Kravcheniuk K.**, Shynkaruk O., Horyuk Y., Semaniuk N. Formation of biofilms on dairy equipment and the influence of disinfectants on them. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5/11 (89). P. 26–33. *(Здобувачем визначено особливості формування мікрофлори технологічного обладнання й готової продукції, здатність мікроорганізмів формувати біоплівки та ефективність дезінфікуючих засобів).*

5. Kukhtyn M., **Kravcheniuk K.**, Beyko L., Horiuk Y., Skliar O., Kernychnyi S. Modeling the process of microbial biofilm formation on stainless steel with a different surface roughness. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 2/11 (98). P. 14–21. *(Здобувач теоретично змодельовано процес деградації біоплівки на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні під час санітарної обробки залежно від фізіологічних і морфологічних особливостей мікроорганізмів, які контамінують обладнання).*

Статті у наукових виданнях іншої держави:

6. Kukhtyn M., Berhilevych O., **Kravcheniuk K.**, Shynkaruk O., Horyuk Y., Semaniuk N. The influence of disinfectants on microbial biofilms of dairy equipment. EUREKA: Life Sciences. 2017. № 5. P. 11–17. *(Здобувачем визначено оптичну густину біоплівки у мікроорганізмах, виділених з технологічного обладнання, чутливість мікрофлори до мийно-дезінфікуючих засобів).*

7. Kukhtyn M., **Kravcheniuk K.**, Beyko L., Horiuk Y., Skliar O., Kernychnyi S. Study of the influence of Savinase®Evity 16L enzyme on biofilms formation of *Staphylococcus aureus* on stainless steel with different roughness.

EUREKA: Life Sciences. 2019. № 2. P. 26–32. *(Здобувачем визначено вплив протеолітичного ензиму Savinase®Eivity 16L на процес руйнування біоплівки, сформованих Staphylococcus saureus на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні).*

Стаття в іншому науковому виданні

8. **Кравченко Х. Ю.**, Кухтин М. Д., Лазарюк В. В. Формування біоплівки *E. coli* на поверхні нержавіючої сталі AISI 321, залежно від шорсткості поверхні. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2016. № 1 (56). С. 95–100. *(Здобувачем проведено визначення процесу формування біоплівки бактерією E. coli на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні та здійснено аналіз отриманих результатів).*

Патенти України на корисну модель:

9. Шинкарук О. Ю., Кухтин М. Д., **Кравченко Х. Ю.** Патент України на корисну модель 109856 Україна. МПК (2016.01) A23C 7/00, B08B 3/08 (2006.01). Рідкий ензимний мийний засіб «Ензимий»; патентовласники О. Ю. Шинкарук, М. Д. Кухтин, Х. Ю. Кравченко. № 201602651; заявлено 17.03.16; опубліковано 12.09.16; Бюл. № 17. 3 с. *(Здобувачем запропоновано мийний засіб і з вмістом ензиму Savinase®Eivity 16L).*

10. **Кравченко Х. Ю.**, Кухтин М. Д., Лазарюк В. В., Шинкарук О. Ю. Патент України на корисну модель 124201 Україна. МПК (2018.01) G01N 9/00, G01N 17/00, G01N 19/04 (2006.01). Спосіб визначення протиадгезивних властивостей харчової сталі за показником щільності мікробної біоплівки шт. *Staphylococcus aureus* ATCC 25; патентовласники Х. Ю. Кравченко, М. Д. Кухтин, В. В. Лазарюк, О. Ю. Шинкарук. № 201710506; заявлено 30.10.17; опубліковано 26.03.18; Бюл. № 6. 4 с. *(Здобувачем запропоновано спосіб оцінювання протиадгезивних властивостей харчової сталі).*

Тези наукових доповідей

11. **Кравченко Х. Ю.**, Кухтин М. Д. Роль технологічного устаткування в мікробному забрудненні харчових продуктів. Новітні науково-технічні рішення в харчовій промисловості: V Міжнародна науково-технічна конференція, м. Львів, 2–3 березня 2015 року: тези доповіді. Львів, 2015. С. 109. *(Здобувачем визначено роль технологічного устаткування в забрудненні молочних продуктів мікроорганізмами, підготовлено матеріали до друку).*

12. **Кравченко Х.**, Кухтин М. Вплив шорсткості поверхні технологічного устаткування на формування мікробних біоплівок. Стан і перспективи харчової науки та промисловості: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 8–9 жовтня 2015 року: тези доповіді. Тернопіль, 2015. С. 40. *(Здобувачем встановлено значення шорсткості поверхні технологічного обладнання на мікробну адгезію і стан біоплівок).*

13. Кравченко Х. Формування біоплівки *E. coli* на поверхні нержавіючої сталі AISI 321 з різною шорсткістю. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: IX Всеукраїнська студентська науково-технічна

конференція, м. Тернопіль, 20–21 квітня 2016 року: тези доповіді. Тернопіль, 2016. С. 208.

14. **Кравченко Х. Ю.**, Кухтин М. Д. Формування біоплівки *E. coli* на поверхні нержавіючої сталі за температури 17 ± 1 °С з різною шорсткістю. Актуальні задачі сучасних технологій: V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 17–18 листопада 2016 року: тези доповіді. Тернопіль, 2016. С. 238–239. *(Здобувачем визначено особливості процесу плівкоутворення E. coli за температури 17 ± 1 °С на поверхні нержавіючої сталі з різною шорсткістю).*

15. **Кравченко Х. Ю.**, Лазарюк В. В., Кухтин М. Д. Вплив шорсткості поверхні нержавіючої сталі AISI 321 на адгезію і процес формування біоплівки *E. coli*. Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 5–7 вересня 2017 року: тези доповіді. Харків, 2017. С. 63–64. *(Здобувачем визначено параметри шорсткості поверхні нержавіючої сталі, за яких повільніше проходить процес адгезії E. coli, підготовлено матеріали до друку).*

16. **Кравченко Х.**, Кухтин М., Лазарюк В. Формування біоплівок *Enterococcus faecalis* на нержавіючій сталі марки AISI 321 залежно від їх початкової кількості і шорсткості поверхні. Стан і перспективи харчової науки та промисловості: IV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 11–12 жовтня 2017 року: тези доповіді. Тернопіль, 2017. С. 113. *(Здобувачем визначено вплив початкової кількості мікроорганізмів на інтенсивність процесу плівкоутворення).*

17. **Кравченко Х. Ю.**, Стадник І. Я., Василів В. П. Формування мікробних біоплівок на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: VIII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 17–18 квітня 2019 року: тези доповіді, Київ, 2019. С. 243. *(Здобувачем визначено й обґрунтовано процес мікробної адгезії на нержавіючій сталі залежно від морфологічних особливостей мікроорганізмів).*

18. **Кравченко Х. Ю.**, Стадник І. Я. Вплив шорсткості поверхні нержавіючої сталі на адгезію мікробної біоплівки *S. aureus* та *E. coli* у молочній промисловості. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: II Міжнародна студентська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 25–26 квітня 2019 року: тези доповіді. Тернопіль, 2019. С. 8. *(Здобувачем визначено параметри шорсткості поверхні нержавіючої сталі з низькими адгезивними властивостями).*

АНОТАЦІЯ

Кравченко Х. Ю. Удосконалення процесу миття поверхонь технологічного обладнання молочної галузі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 03.00.20 «Біотехнологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню адгезійних властивостей утворення та деградації біоплівки на технологічному обладнанні молочної галузі й технологічних параметрів при їх санітарній обробці. Розкрито основну суть виживання мікрофлори на поверхнях обладнання під час санобробки, у так званих «мертвих зонах» (згини, з'єднання, прокладки, клапани, тріщини, подряпини) за рахунок формування біоплівки.

Встановлено закономірності процесу плівкоутворення на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні та виявлено, що за величини шорсткості R_a більше $0,95 \pm 0,092$ мкм формуються щільні біоплівки незалежно від морфологічного складу мікрофлори. Водночас, адгезія та процес плівкоутворення сповільнюються бактеріями *E. coli*, *E. faecalis* та *S. aureus* за шорсткості поверхні нержавіючої сталі $0,16$ мкм.

Запропоновано оцінювати протиадгезивні властивості нержавіючої сталі за показником оптичної густини сформованих біоплівок *S. aureus*.

На основі теоретичного й математичного моделювання процесу формування і деградації біоплівок на поверхні нержавіючої сталі з різною шорсткістю під час санітарної обробки, запропоновано використання ежекторного пристрою з $0,1$ % мийним засобом «Ензимий, що дозволяють зменшення прикріплення мікроорганізмів до поверхні та зниження контамінації молочних продуктів.

Проведено апробацію результатів дисертаційного дослідження в промислових умовах. Розроблено та захищено патентами нові технічні рішення для технологічного процесу санобробки обладнання.

Ключові слова: бактеріальна біоплівка, адгезія, санобробка, ежектор, математична модель.

АННОТАЦІЯ

Кравченко Х. Ю. Совершенствование процесса мытья поверхностей технологического оборудования молочной отрасли. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 «Биотехнология». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2019.

Диссертация посвящена обоснованию адгезионных свойств образования и деградации биопленки на технологическом оборудовании молочной отрасли и технологических параметров при их санитарной обработке. Раскрыта основная суть выживания микрофлоры на поверхностях оборудования при санобработке, в так называемых «мертвых зонах» (сгибы, соединения, прокладки, клапаны, трещины, царапины) за счет формирования биопленки.

Установлены закономерности процесса пленкообразования на нержавеющей стали с различной шероховатостью поверхности и обнаружено, что при величине шероховатости R_a больше $0,95 \pm 0,092$ мкм формируются плотные биопленки независимо от морфологического состава микрофлоры. В то же время, адгезия и процесс пленкообразования замедляются бактериями

E. coli, *E. faecalis*, *S. aureus* при шероховатости поверхности нержавеющей стали 0,16 мкм.

Предложено оценивать противадгезивные свойства нержавеющей стали по показателю плотности сложившихся биопленок *S. aureus*.

На основе теоретического и математического моделирования процесса формирования и деградации биопленок на поверхности нержавеющей стали с различной шероховатостью при санитарной обработке, предложено использование эжекторного устройства с 0,1 % моющим средством «Энзим», позволяющие уменьшения прикрепления микроорганизмов к поверхности и снижения контаминации молочных продуктов.

Проведена апробация результатов диссертационного исследования в промышленных условиях. Разработаны и защищены патентами новые технические решения для технологического процесса санобработки оборудования.

Ключевые слова: бактериальная биопленка, адгезия, санобработка, эжектор, математическая модель.

ANNOTATION

Kravcheniuk K. Y. Improvement of Surface Cleaning of Milk Industry Production Equipment. – The Manuscript.

Dissertation with a view to obtaining the academic degree of Candidate of Sciences in the specialty 03.00.20 «Biotechnology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The thesis discusses the substantiation of adhesive properties of biofilm formation and degradation on milk industry production equipment and technological parameters under sanitary treatment conditions.

Some analytical review of the influence of biofilms formation by bacteria with different morphological and physiological characteristics due to the specific use of production and auxiliary equipment with certain roughness of stainless-steel surface and its behavior after sanitary treatment has been made in the thesis. The main reason of microflora survival on the equipment surfaces after their disinfection in so called «dead zones» (bends, joints, gaskets, valves, cracks, scratches) due to the biofilm formation has been discovered. It was found out that there were approximately 1000 microorganisms formed in biofilms on the equipment where at least one plankton bacterium was found.

Stainless steel surfaces in the different types of machines have been classified according to the surface roughness characteristics that eventually defines the process operation. The prospects of using the instruments and machines for the sanitary treatment of equipment have been determined. The purpose and objectives of the thesis under discussion have been stated on the basis of the analysis of specific features of biofilms formation by some bacteria, advantages and disadvantages of process sanitary treatment, peculiarities of material and energy flows transformation. The investigation in this field will make possible to determine and substantiate scientifically the parameters of sanitary treatment of production equipment aimed at

maximum reduction of microbial adhesion process resulted in efficient degradation of biofilms and high-quality products manufacture.

A framework of conducting the theoretical and experimental study divided into four stages has been given. Some plates made of stainless corrosion-resistant nickel-chromium austenitic steel AISI 321 (standard of American institute of steel and alloys) of 30×30 mm size and of thickness 1,2 mm, of the surface roughness $R_a=2.68\pm0.014$ mkm, $R_a=0.95\pm0.092$, $R_a=0.63\pm0.087$, $R_a=0.30\pm0.065$, $R_a=0.25\pm0.035$, $R_a=0.24\pm0.026$ and $R_a=0.16\pm0.018$ mkm have been used in the research. The necessary methods and tools for conducting the research have been developed.

The considerable part of the paper under discussion is devoted to the physics of biofilm formation mechanism, biofilm development character, determination of contamination by the microorganisms of the surfaces of production equipment and milk products at milk processing enterprises. We came to the conclusion that the more contaminated is the surface by the microorganisms the quicker film formation process and dense biofilms formation process are taking place.

We have discovered that *E. coli* and *E. faecalis*. biofilms formation is considerably influenced by both the surface roughness and initial number of bacteria. It was found that under the same conditions *E. coli* biofilm had lower density comparing to the *E. faecalis* biofilm on the stainless-steel surface. The mathematical-statistical processing of the research results has been conducted by the method of regression-correlation analysis. Theoretical study of pipe-line liquid motion dynamics has allowed to discover the following phenomena: some eddy formation can be observed, the liquid reverse motion takes place, the flow separation from the joint surface occurs. All this eventually resulted in considerable speed and pressure losses. The process of adhesive bond elimination, i. e. biofilm degradation, due to its separating from the surface by different cleaning agents when we need some efforts to overcome the hydrodynamic resistance and internal stress has been taken into consideration.

The theoretical modeling has proved that the process of stainless-steel biofilm degradation under sanitary treatment conditions will be the most difficult at the surface roughness 2.68–0.95 mkm. It can be explained by the fact that both coccus and string formed bacteria formed from the biobifilm can be found in the surface depressions. Meanwhile, at steel surface roughness 0.63–0.16 mkm the formed biofilms are less protected by the surface depressions so the process of degradation will take place more quickly.

The necessary mathematical simulation of a bacterial film adhesion in the transport system has been conducted which was conveniently classified into two cases: when bacterial slime removal is taking place on the elbow surface and when there isn't any slip ratio. It was found that the degree of surface treatment is influenced by physical-chemical properties of film medium, hydrodynamic state of the system, its dissipative characteristics, the level and degree of power input area, kinematic parameters of liquid phase and bacterial film contact on the rough surfaces of material pipe.

The synthesis of the ejector integrated model for the sanitary treatment of pipelines has been conducted on the basis of continuum mechanics, CFD-methods (Computational Fluid Dynamics), when the system of Navier-Stokes or Reynolds equations has been solved by numerical methods of calculating hydrodynamics dealing with liquid flow inside the ejector. We have found that the pressure equals to 0.367 MPa at the ejection device inlet and after components being mixed in the convergent zone the pressure is decreasing so that it is equal to 0,38 MPa at a distance of 13 mm from the components supply port. At the ejection device outlet, the average mixture pressure is 0.32 MPa. The obtained data have proved that it is much easier to remove the bacterial film by the proposed ejecting mechanism and enzyme *Savinase®Evity 16L* use for sanitary treatment. The use of the suggested ejector ensures the 0.8 % higher efficiency; 1.2 % reduction of maintenance costs; 3 % cost saving of an operator's fees. Economic benefits of the developed design implementation 13523,94 hrn with payback period 3 months.

Key words: bacterial biofilm, adhesion, sanitary treatment, ejector, mathematical model.

Підписано до друку 08.11.19
Ум. друк. арк. 0,9
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Обл.-вид.арк. 0,9
Зам. № 191014

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55

