

**Х. Ю. КРАВЧЕНЮК, І. Я. СТАДНИК, С. М. МОЛЬЧЕНКО, І. М. ДЕМИДОВ**

### **АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦІЇ БАКТЕРІАЛЬНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНІ ТРУБОПРОВОДУ ІЗ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ**

Розглянута фізична сутність впливу гідравлічних опорів та вершин шорсткості в примежовому шарі з великим градієнтом швидкості миючих 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 із шорсткою поверхнею у транспортуючій 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, формуючі 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 із середовищем, що встановлюють реальну зміну контакту адгезиву у трубопроводі. Встановлено, що для забезпечення змінної площі фактичного контакту, що сприяє кращій деградації біоплівки, і відповідно, проходженню якісного процесу санітарної обробки поверхонь, необхідною умовою являється додержання швидкості руху миючих засобів до відповідних технологічних параметрів.

**Ключові слова:** біоплівка; адгезія; площа контакту; градієнта швидкості.

**К. Ю. КРАВЧЕНЮК, И. Я. СТАДНИК, С. Н. МОЛЬЧЕНКО, И. Н. ДЕМИДОВ**

### **АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

Рассмотрена физическая сущность влияния гидравлических сопротивлений и вершин шероховатости в пограничном слое с большим градиентом скорости моющих средств в транспортирующих трубопроводах сырья на адгезию, которая устанавливает зависимость от формы, градиента скорости и угла шероховатости, прикладывания механических сил, степени предварительной дисперсности и физико-механических свойств среды. Установлен характер контактного взаимодействия бактериальной биопленки с шероховатой поверхностью в транспортирующем трубопроводе и пути деградации биопленки. Нарушение этих взаимных соотношений приводит к эффективной санитарной обработке и, соответственно, выпуску качественной продукции и ее срока хранения. Обосновано площадь контакта адгезива и составляющие, формирующие работу на преодоление адгезии и деформации среды при определении критериев, влияющих на процесс, соответственно к каждому определенному периоду стадии деформации. Полученные данные дают ответ на ряд вопросов о возможности взаимодействия поверхности со средой, устанавливают реальное изменение контакта адгезива в трубопроводе. Установлено, что для обеспечения переменной площади фактического контакта, которая способствует лучшей деградации биопленки, и соответственно, прохождению качественного процесса санитарной обработки поверхностей, необходимым условием является соблюдение скорости движения моющих средств до соответствующих технологических параметров.

**Ключевые слова:** биопленка; адгезия; площадь контакта; градиента скорости.

**Kh. Yu. KRAVCHENYUK, I. Ya. STADNYK, S. M. MOLCHENKO, I. M. DEMYDOV**

### **ANALYTICAL MODEL OF THE BACTERIAL FIBER DEGRADATION ON THE SURFACE OF THE PIPELINE FROM STAINLESS STEEL**

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 established. Violations of these mutual relations lead to efficient sanitary treatment, and in accordance with the release of quality products and the period of their sustainability. 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 established that in order to provide a variable area of actual contact, which contributes to better degradation of biofilms, and, accordingly, the passage 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.

**Keywords:** biofilm; adhesion; contact area; velocity gradient.

**Вступ.** У харчових технологіях при підготовці сировини, отриманні напівфабрикатів, готових виробів, їх зберіганні велике значення має взаємодія продукту з різними рухомими і нерухомими поверхнями. Така взаємодія, як правило, призводить до прилипання продукту до поверхні робочих органів, робочих камер технологічного обладнання, а також конструкційних і технологічних матеріалів, тари тощо. У техніці явище прилипання прийнято називати адгезією [1].

Адгезія харчових мас частіше є небажаною. Часто приходиться стикатись з явищем, коли середовище прилипає до поверхонь, а при його вилученні частина залишається на поверхні

останньої. Це призводить до втрат і псування напівфабрикату та товарного вигляду. Отже, адгезія негативно впливає на ефективність використання обладнання, якість продукту, призводить до збільшення витрат сировини і енергетичних ресурсів, ускладнює санітарні умови підприємств.

З широким впровадженням у харчове виробництво сучасних автоматизованих, комплексно механізованих ліній, коли швидкість оброблення ньютонівських харчових мас значно зросла і широко впроваджуються нові конструкційні матеріали, завжди залишається необхідність у

© Кравченко Х.Ю., Стадник І.Я., Мольченко С.М., Демидов І.М., 2019

вивченні міцності адгезії, моделюванні процесів. Моделювання технологічних процесів спрямовується на зону розділення з урахуванням як виду і стану поверхні, так і структурно-механічних властивостей неньютонівських харчових мас.

Мало вивченими і особливо складними для моделювання залишаються процеси, пов'язані з адгезією структурованих мас, таких, як з утвореною біоплівкою на підприємствах молочної галузі. Дане явище досліджували багато винахідників, які розкривали суть та можливі шляхи зменшення адгезії, проводили визначення при допомозі теоретичних й експериментальних досліджень і проводили обґрунтування математичним моделюванням. Тому на наш погляд зменшити негативний вплив адгезії на технологічні процеси можна за допомогою всебічного вивчення цього явища, тобто на основі застосування сучасних методів моделювання, аналізу процесів у зоні контакту поверхня – продукт.

**Аналіз досліджень.** Адгезія пружно-пластичних мас реалізується на межі розділу двох твердих тіл. Пружно-пластичні тіла мають аномальну в'язкість, яка змінюється залежно від напруги зсуву, властивостей маси та інших факторів. Причина мінливості в'язкості полягає в особливостях структури пружно-пластичних тіл. Адгезія як поверхневе явище виникає на межі розподілу двох фаз різномірних конденсованих тіл: біоплівка – одна фаза, поверхня контакту – друга фаза [2]. Поверхневі властивості біоплівки, зокрема адгезія, залежить від об'ємних властивостей самих мас. Останні визначають площу контакту двох тіл, яка впливає на величину адгезії та її наслідок, який характеризує стан поверхні після видалення прилиплої маси. Відрив матеріалу від твердої контактної поверхні може мати адгезійний (межа поділу проходить по поверхні контактної поверхні), когезійний (межа поділу міститься в шарі продукту) і змішаний характер [1–3]. Адгезія обумовлена різними за своєю природою силами та зв'язками, їх можна умовно розбити на дві групи. Перша група сил проявляється при зближенні двох тіл і за відсутності контакту між ними, коли є зазор певної величини. Ці ж сили діють і після порушення контакту різномірних тіл і не можуть існувати за відсутності контакту.

В результаті розглянутих робіт (2,3,4) встановлено, що конструктивні параметри трубопроводів спрямовані для забезпечення рідинних потоків при вирівнюванні і перерозподіленні різного роду опорів за рахунок зменшення шорсткості внутрішньої поверхні. Хоча процес потоку рідини на перший погляд уявляється простим, але побудова його математичної моделі і пошук основних розрахункових залежностей досить складний. Зараз є ряд рішень вказаної задачі, котрі базуються на спрощенні дійсного процесу і не враховують впливу еластично-в'язкої і пластичної структури матеріалу і

дії на неї коливань тиску. Через те що тиск рідини (миючого засобу) на стінки трубопроводу передається по нормалі, на підставі робочого тиску, що задається, і епюри його зміни по довжині, можна визначити сили, які діють на утворену біоплівку, спрямованих на її деградацію в зонах утворених опорів [1]. Вважається, що адгезія до поверхні – це складний фізико-хімічний процес, який залежить від: властивостей поверхні, таких як топографія, шорсткість, гідрофобність, хімічний склад та поверхнева енергія; початкової кількості середовища, його розмірів, температури і рН навколишнього середовища тощо [1, 2, 3, 4]. Проте, серед багатьох наведених чинників, які впливають на процес адгезії, дослідники [4, 5] вважають, що властивості поверхні відіграють основну роль. Внаслідок чого було запропоновано три теорії мікробної адгезії до поверхні: термодинамічна, DLVO (Deryaguin–Landau–Verwey–Overbeek) теорія та теорія розширеного XDLVO [1, 6, 7].

Термодинамічна теорія ґрунтується на тому, що при прикріпленні частинок до поверхні відбувається зміна загальної вільної енергії Гіббса (енергія, яка визначається в закритій системі). Розраховується дана енергія за рівнянням Ліфшица-Ван дер Ваальса і кислотно основних взаємодій Люїса [3].

$$\Delta G_{ADH} = \Delta G_{LW} + \Delta G_{AB} \quad (1),$$

де  $\Delta G_{ADH}$  – зміна загальної вільної енергії Гіббса, що приймає участь в адгезії;  $\Delta G_{LW}$  – зміна загальної вільної енергії Гіббса та сил Ліфшица-Ван дер Ваальса;  $\Delta G_{AB}$  – зміна вільної енергії кислотно основних сил Люїса.

Термодинамічна теорія припускає, що адгезія завжди зворотній і незалежний від відстані процес. Дана теорія не визначає впливу поверхневого заряду і концентрації електролітів навколишнього середовища. Вважається, що дана теорія найбільш точна при роботі з незарядженими поверхнями або при наявності в середовищі великої кількості електролітів [3]. Теорія DLVO ґрунтується на термодинамічній теорії, а також припускає, що адгезія являється сумою міжфазних енергій. Дана теорія вважає, що колоїдні частинки дисперсної системи можуть безперешкодно зближуватися одна з одною, доки не відбудеться контакт їхніх рідких дифузних оболонок.

$$U^{DLVO} = U^{LW} + U^{EL} \quad (2),$$

де  $U^{DLVO}$  – повна енергія взаємодій;  $U^{LW}$  – енергія сил Ліфшица-Ван дер Ваальса;  $U^{EL}$  – електростатична енергія взаємодій.

Теорія припускає, що адгезія може бути зворотною і залежить від відстані. Вона є найбільш точною, коли електростатичні сили переважають, проте вона обмежена у випадку ігнорування ефекту поляричних взаємодій [3].

З метою більш точного моделювання мікробної адгезії була запропонована теорія XDLVO, яка ґрунтується на термодинамічній і DLVO теорії [4]. Згідно цієї моделі вважається, що адгезія являється сумою сил Ліфшица-Ван дер Ваальса, електростатичних та вільної енергії кислотно основних сил Люїса.

$$U^{DLVO} = U^{LW} + U^{EL} + U^{AB} \quad (3),$$

де  $U^{DLVO}$  – повна енергія взаємодій;  $U^{LW}$  – енергія сил Ліфшица-Ван дер Ваальса;  $U^{EL}$  – електростатична енергія взаємодій;  $U^{AB}$  – енергія кислотно основних сил Люїса.

Як у випадку з DLVO теорією, XDLVO модель вважає, що адгезія може бути зворотною і залежить від відстані. Проте, дослідники [1, 6] вважають, що всі три теоретичні моделі, які мають на меті розкрити суть адгезії до поверхні розроблені для ідеальної колоїдної системи. У виробничих умовах адгезія набагато складніший процес і її прикріплення до поверхні може відбуватися по різному [5]. Тому на наш погляд процес адгезії до поверхні на практиці часто відрізняється від вище описаних теорій. Це пов'язано з тим, що поверхні твердих матеріалів піддаються впливу різних контактуючих середовищ, адсорбують на собі органічні і неорганічні речовини, утворюючи таким чином кондиціонуючий шар, до якого приходить прикріплення контактуючого середовища. У подальшому при дії рушійних сил, сформований кондиціонуючий шар змінює фізико-хімічні властивості поверхні, і таким чином впливає на процес адгезії.

На основі викладеного вважаємо, що адгезія середовища до твердих поверхонь є двофазним процесом, який складається із вихідної зворотної (фізичної) і наступної незворотної (молекулярної або клітинної) фази. Також адгезія до твердої поверхні може бути пасивна або активна, що залежить від рушійних сил та транспорту клітин середовища на основі гравітації, дифузії чи за допомогою гідродинамічних сил. Крім цього на процес адгезії впливають фізико-хімічні властивості середовища, фазовий склад та шорсткість поверхні.

Ґрунтуючись попередніми дослідженнями [4, 6, 7] при вивченні адгезії необхідно підходити комплексно і враховувати поряд з шорсткістю топографію поверхні, так як ці величини є взаємозалежні. Шорсткість поверхні відноситься до двовимірного параметру поверхні матеріалу і зазвичай описується як середня арифметична шорсткість ( $R_a$ ) та середня квадратична шорсткість ( $R_q$ ). У той же час, топографія має трьох мірні параметри і описує елементи форми поверхні [6, 8]. Тому при вивченні адгезії звертаємо увагу на шорсткість поверхні та параметри топографії. Отже, виходячи з цього процес адгезії тісно пов'язаний із амплітудними параметрами поверхні (шорсткість) та її просторовими змінами, які характеризуються морфологічними особливостями

ми поверхні (топографія). Тому теорія прикріплення середовища до поверхні повинна враховувати переважно фізико-хімічні аспекти поверхні матеріалів, а у меншій мірі звертати увагу на морфологічні і фізіологічні особливості середовища.

Проблемою, що ускладнює визначення адгезійної міцності, є встановлення фактичної площі контакту. Адже на величину площі фактичного контакту впливає багато факторів: нормальний тиск, природа контактуючих тіл, а також зовнішні чинники – температура, напруженість, тривалість попереднього навантаження, швидкість зростання зусилля відриву. Ці фактори здійснюють різний вплив на зміну фактичної площі контакту.

**Мета статті.** Встановити зв'язок конструктивних параметрів поверхні при санітарній обробці на деградацію біоплівки з використанням методу, який ґрунтується на статистичному моделюванні.

**Постановка задачі.** Системи для напірного переміщення миючого засобу є важливою складовою при санітарній обробці поверхонь. Обмежена допустима течія в пришаровому потоці в трубопроводах вимагає створення специфічних умов синтезу систем «течія – утворена біоплівка» за використання сил адгезії (вимірюється в Н) й гідравлічного тертя в ролі сил рушійних і сил опору. У зв'язку з цим в інтересах оптимізованого синтезу необхідно є інформація, яка стосується явищ і особливостей адгезії, можливостей її трансформації в кінематичних парах як у бік збільшення, так і в бік зменшення. Різновиди біоплівок з своїми особливостями, механічними параметрами і коефіцієнтами тертя, в основі взаємодій між поверхнею трубопроводу і біоплівкою вбачається їх відповідність законам тертя Амонтона-Кулона, співвідношенням Ейлера, поняттям кут і конус тертя, радіус і круг тертя, приведений коефіцієнт тертя. В свою чергу формулювання цих понять і визначень стосується таких загально визначених припущень і понять, як результуюча сил тяжіння, результуюча розподілених сил нормального тиску, результуюча сила адгезії, центр мас, геометричний центр поверхні контактування тощо. В технологіях розрахунків і визначень параметрів систем присутні закономірності динаміки та принципи незалежності дії сил, адитивності, Лагранжа-Даламбера.

В пошуках розв'язання задач досліджень здійснювалося моделювання для оцінки зовнішніх впливів на реакції і відгуки локальних зон систем на основі математичних формалізацій і з постановкою обчислювальних експериментів. Запропоновано математичну модель сил адгезійного фактору впливу, який на відміну від коефіцієнта тертя виступає зі стабілізованим значенням. Важливо, що це стосується для забезпечення деградації біоплівки при напірній течії миючого засобу. Модифіковані теоретичні залежності дозволили здійснити розрахункові дворівневі експерименти для створення перспектив поглиблення можливостей генерування

збільшених рушійних факторів. Структура біоплівки призводить до необхідності врахування значень коефіцієнтів тертя. Прояви неізотропності відносно орієнтації структур мають місце на рівнях молекулярної побудови у відгуках на значення коефіцієнтів тертя. Одержано відповідні рівняння регресій.

**Викладення основного матеріалу.** На основі розглянутих методів і засобів для транспортування рідин і санітарної обробки технологічного обладнання, особливо трубопроводів, де присутні різні мертві зони, кутові переходи та перепади, нами прийнято рішення зробити теоретичне обґрунтування процесу впливу факторів на утворення та змивання бактеріальної плівки. Оскільки кут охоплення  $\alpha$  утвореної бактеріальної плівки в трубопроводах на згинах, переходах для сировини виступає в ролі важливого варіативного фактора впливу, то на основі аналітичних розробок проведемо обчислювальний експеримент, в якому функцією відгуку приймемо значення вказаного кута. Очевидно, що в окремих випадках пошук геометричних зв'язків для забезпечення визначених кутів охоплення бактеріальної плівки може бути суттєво спрощеним, якщо вирішується початковий синтез технологічного обладнання. Разом з тим нестабільність значень адгезії і зовнішніх умов експлуатації систем трубопроводів, рівно як і варіації фізико-механічних параметрів бактеріальної плівки, призводять до

необхідності пошуку нестандартних підходів для забезпечення заданих кінематичних параметрів їх змивання. Ситуація, пов'язана з обмеженими параметрами міцності, ускладнюється значними початковими масами бактеріальної плівки, особливостями механізмів подачі і транспортування мийного засобу тощо.

Теорія фрикційних взаємодій бактеріальної плівки з елементами транспортної системи створювалася на основі припущень про обмежений опір в деформаціях зсуву, стискання, розтягування. Сили адгезії бактеріальної плівки розподілені по дузі (коліні). В першу чергу залежать від утвореної дуги охоплення (площі), попереднього натягу і коефіцієнтів тертя. Вивчення явища адгезії бактеріальної плівки з транспортною системою умовно поділяємо на два випадки: змивання бактеріальної плівки проходить по поверхні коліна, і коли повне відносне ковзання відсутнє. Обидва ці випадки мають місце в системах транспортування і використання в'язких матеріалів, властивості яких щодо обмежених опорів деформацій зсуву, стискання і розтягу. Зупинимося більш детально на співвідношеннях між силовими параметрами системи «бактеріальна плівка – коліно» рис. 1. Цей випадок відповідає системі для зміни напрямків в траєкторіях течії або для створення і стабілізації опорів під час течії та натягів на окремих ділянках.

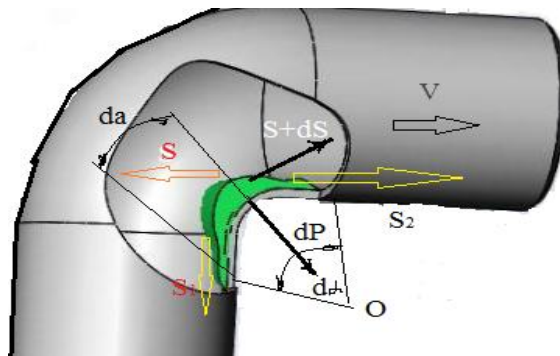


Рис. 1 – Схема для визначення сили адгезії утвореної плівки

Приймаємо, що утворена плівка (пикордонний шар) на внутрішній поверхні коліна заданої кількості не деформується, а її швидкість ковзання  $V = \text{const}$ . Масою цієї плівки і її відцентровою силою нехтуємо. За необхідності подолання сили адгезії  $F_{ad}$  маємо:

$$s_2 = s_1 - F_{ad} \quad \text{і звідси} \quad F_{ad} = s_2 - s_1. \quad (1)$$

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

$$dF_{ad} = (s+ds) - s = ds \quad \text{і} \quad dF_{ad} f dP, \quad (2)$$

де  $dP$  – елементарна сила притискання, яка визначається за відомих сил  $s$  та  $s+ds$ .

Якщо знехтувати величинами другого порядку і замінити паралелограм ромбом зі сторонами  $s$ , то:

$$dP = 2s \sin da/2 = 2s da/2 = sda \quad (3)$$

Тоді з врахуванням рівнянь (2), маємо:  $ds/s = fda$ . (4)

Інтегруванням лівої і правої частин умови (4) в межах від  $s_1$  до  $s_2$  і, відповідно, від нуля до  $\alpha$ , отримаємо:

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{s} = \int_0^{\alpha} f d\alpha \quad \ln \frac{s_2}{s_1} = f\alpha. \quad (5)$$

Звідси:

$$s_2 = s_1 e^{f\alpha} \quad (6)$$

Тоді з врахуванням умови (1), запишемо:

$$F_{ad} = s_1 (e^{f\alpha} - 1). \quad (7)$$

Сила  $F_{ad}$  є тією найбільшою силою, яка може бути передана. Розподілена адгезії, що діє на плівку дорівнює різниці  $s_1$  і  $s_2$ , тобто:

$$F_{ad} = s_1 - s_2 = s_2(e^{f\alpha} - 1). \quad (8)$$

Значення  $s_1$  має співставлятися з допустимим навантаженням плівки з умови міцності на розтягування і при цьому:

$$[s_1] \leq [\sigma_0] f_0 [s] \quad (9)$$

де  $[\sigma_0]$  – допустимі напруження, Па;  $f_0$  – площа поперечного перерізу,  $m^2$ .

Умова передавання руху на плівку визначається величиною кута охоплення  $[\alpha]$ .

$$[\alpha] \geq \frac{\ln \frac{s_1}{s_2}}{f} \geq \frac{\ln \frac{[\sigma_0] f_0}{s_2}}{f}. \quad (10)$$

За умови дії потоку рідини, сила адгезії частково зменшуються за рахунок дії відцентрових сил. За врахування останніх співвідношення між силовими параметрами набувають вид:

$$s_1 = F_{ad} \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} \quad (11); \quad s_2 = \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} qv \quad (12)$$

$$F_{ad} = (s_1 - \frac{gv^2}{g}) \frac{e^{f\alpha} - 1}{e^{f\alpha}} \quad (13)$$

де  $v$  – колова швидкість, м/с;  $q$  – маса вязкого елемента плівки, кг/м;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ .

Наведений в роботі набір математичних формалізацій дозволяє виконати планування обчислювальних експериментів з числом факторів від двох до чотирьох з одержанням різних функцій відгуку, використовуючи одержані математичні формули на рівні алгоритмів розрахунків в безпосередньому застосуванні або їх сполучень. В першому наближенні звернемося до формули (7), в якій функція відгуку представлена силою адгезії  $F_{ad}$ , а до числа факторів впливу віднесемо натяг  $s_1$  біоплівки, кут охоплення  $\alpha$  і коефіцієнт тертя  $f_{T3}$ . Орієнтиром при виборі значення  $s_1$  має бути величина  $s_{1max}$ , яка визначається через площу поперечного перерізу біоплівки і допустиме напруження  $[\sigma_0]$  в його навантаженні на розтягування і при цьому:

$$s_{1max} \leq [\sigma] b \delta \quad (14)$$

де  $b$  і  $\delta$  – відповідно ширина і товщина біоплівки, мкм.

У зв'язку з тим, що відбувається дворівневий експеримент, кожен з факторів набуває два значення: верхній Хів і нижній Хін рівні.

Оскільки планування і опрацювання експериментів виконуються не з фізичними, а з кодованими величинами, визначено кодовані зміни  $x_i$  (табл.1).

Таблиця 1 – Умови проведення експерименту

Величина	Фактори		
	S <sub>1</sub> , Н	$\alpha$ , rad	F
Кодове позначення фактора	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основний рівень, Н	0,9S <sub>1max</sub> =2250	2,617	0,3
Інтервал варіювання, Н	0,1S <sub>1max</sub> =250	0,523	0,1
Нижній рівень, Н	$s_i^0 - h_i = 2000$	2,093	0,2
Верхній рівень, Н	$s_i^0 + h_i = 2500$	3,13	0,4

Обробку експериментального масиву даних провели з використанням пакету прикладної програми «Statistica-12» для комп'ютера. Коефіцієнти рівняння регресії або апроксимуючої функції, за умови ортогональності та симетрії план-матриці планованого факторного експерименту, визначали згідно з стандартною методикою за відомими залежностями.

Рівняння регресії має вид:

$$y = -5095.9 + 0.29X_1 + 2632.05X_2 + 9130.19X_3.$$

При рівні вірогідності  $p = 0,95$  та значення  $t$ -альфа критерію рівному 2,365, отримали такі статистичні дані:

коефіцієнт множинної детермінації  $D = 0,842$ ;

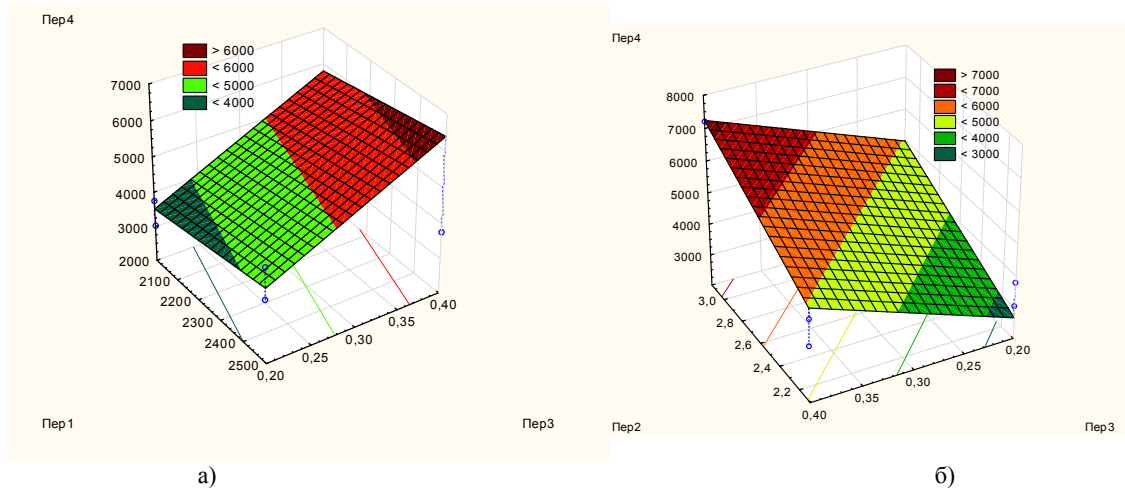
коефіцієнт множинної кореляції  $R = 0,917$ ;

стандартне відхилення оцінки  $s = 0,802$ ;

$F$ -критерій Фішера дорівнює 7,087.

Коефіцієнт  $D$  значимий з рівнем вірогідності  $P = 0,92863$ . З нього витікає, що всі фактори впливу є важливими з точки зору інтересів підвищення натягу біоплівки в контактній площині, оскільки рушійним фактором при цьому є сила адгезії (умова (2)).

Графічне зображення зміни адгезійної сили біоплівки згідно експериментальних даних подано на рис.2, тобто поверхня відгуку функціональної зміни сили адгезії біоплівки як функціонал  $F_{ad} = f(f_T, \alpha)$ .

Рис. 2. Графіки відгуку залежностей: а) у від  $x_1$  і  $x_2$ ; б) у від  $x_2$  і  $x_3$ 

**Висновки.** Сучасна теоретична база синтезу технологічних процесів на основі взаємодії рухомої рідини з середовищем (бактеріальною плівкою) поєднує можливості врахування технологічних, економічних вимог, показників високої продуктивності, енергетичних заощаджень, обмежень динамічних навантажень тощо. Досягнення поєднання вказаних вимог в значній мірі пов'язано з використанням адгезійних зв'язків

безпосередньо як між мийним засобом технологічних машин, так і в лініях транспортування сировини. В системах переміщень середовища переважає застосування гідродинамічне тертя рідини у поверхню трубопроводу. Енергетичні витрати в системах переміщень рідини пов'язані з роботою рушійних сил проти адгезії й тертя та на створення потоків кінетичної енергії рухомих мас.

#### Список літератури

1. Зимон А.Д., 1985. Адгезия пищевых масс. Агрпроимиздат, Москва. 271 с.
2. Гудь В.С., Коваль О.А., 2006. Адгезія харчових продуктів в процесах пакування. Упаковка. ПРОФИ ПРЕСС, – К., 2, 39–42.
3. Moriarty T.F., Poulsson A. H. C., Rochford E. T. J., Richards R. G., 2011. Bacterial Adhesion and Biomaterial Surfaces, In: P. Ducheyne (Ed.), Comprehensive Biomaterials, Elsevier Ltd., Oxford, 75–100.
4. Hovnar M., Jenko M., Godec M., Drobne D., 2014. An overview of the influence of stainless-steel surface properties on bacterial adhesion. Materials and technology, 48(5), 609–617.
5. Crawford R.J., Webb H.K., Truong V.K., Hasan J., Ivanova E.P., 2012. Advances in Colloid and Interface Science, 179, 142–149.
6. Merritt K., An Y. H., 2000. Factors Influencing Bacterial Adhesion. Handbook of Bacterial Adhesion, Humana Press, New Jersey. 53–72.
7. 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, 13–33.
8. Hori K., Matsumoto S., 2010. Biochemical Engineering Journal, 48, 424–434.

#### Bibliography (transliterated)

1. Zimon A.D. 1985. *Adgeziya pishevyih mass*. Moskva: Agrpromizdat Publ., 271 p.
2. Huts V.C., Koval O.A., 2006. Adheziia kharchovykh produktiv v protsesakh pakuvannia. Upakovka. PROFY PRESS, Kyev, 2, 39–42.
3. Moriarty T. F., Poulsson A. H. C., Rochford E. T. J., Richards R. G., 2011. Bacterial Adhesion and Biomaterial Surfaces, In: P. Ducheyne (Ed.), Comprehensive Biomaterials, Elsevier Ltd., Oxford. 75–100.
4. Hovnar M., Jenko M., Godec M., Drobne D., 2014. An overview of the influence of stainless-steel surface properties on bacterial adhesion. Materials and technology. 48(5), 609–617.
5. Crawford R. J., Webb H. K., Truong V. K., Hasan J., Ivanova E. P., 2012. Advances in Colloid and Interface Science, 179, 142–149.
6. Merritt K., An Y.H., 2000. Factors Influencing Bacterial Adhesion. Handbook of Bacterial Adhesion, Humana Press, New Jersey. 53–72.
7. 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, 13–33.
8. Hori K., Matsumoto S., 2010. Biochemical Engineering Journal, 48, 424–434.

Надійшла (received) 08.07.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кравченко Христина Юрївна (Кравченко Кристина Юрьевна, Kravcheniuk Khrystyna Yuriivna)** – старший лаборант кафедри харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7547-6834>; e-mail: [kravchenukx30@gmail.com](mailto:kravchenukx30@gmail.com).

**Стадник Ігор Ярославович (Стадник Игорь Ярославович, Stadnyk Ihor Yaroslavovych)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>; E-mail: [igorstadnyk@gmail.com](mailto:igorstadnyk@gmail.com).

**Мольченко Світлана Миколаївна (Мольченко Светлана Николаевна, Molchenko Svitlana Mykolaivna)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології жирів та продуктів бродіння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7897-8947>; e-mail: [molchenko.svetlana@gmail.com](mailto:molchenko.svetlana@gmail.com)

**Демидов Ігор Миколайович (Демидов Игорь Николаевич, Demydov Ihor Mykolaiovych)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології жирів та продуктів бродіння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5854-0833>; e-mail: [demigon50@ukr.net](mailto:demigon50@ukr.net)