

**В. М. МЕЛЬНИК, О. В. ВОРОБЬОВА, Н. В. ОСТАПЕНКО**

### **МОДЕРНИЗАЦІЯ АНАЕРОБНОГО БІОРЕАКТОРУ ДЛЯ УСТАНОВКИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНОЇ ВОДИ**

Розроблено нову конструкцію теплообмінного пристрою анаеробного біореактора з іммобілізованими мікроорганізмами для забезпечення необхідного температурного режиму роботи біореактора. Дана конструкція біореактора може забезпечувати необхідний ступінь очищення стічної води при значно менших витратах коштів на будівництво, експлуатацію та матеріально-енергетичні ресурси. Для наглядності конструктивних особливостей було спроектовано біореактор з площинним завантаженням в програмному комплекті *SOLIDWORKS* та побудовано математичну модель процесів анаеробного очищення стічних вод.

**Ключові слова:** біореактор, стічна вода, анаеробний, мікроорганізми, іммобілізовані мікроорганізми, органічні забруднення, кінетика процесу.

### **В. Н. МЕЛЬНИК, О. В. ВОРОБЬОВА, Н. В. ОСТАПЕНКО** **МОДЕРНИЗАЦИЯ АНАЭРОБНОГО БИОРЕАКТОРА ДЛЯ УСТАНОВКИ ОЧИЩЕНИЯ СТОЧНОЙ ВОДЫ**

Разработана новая конструкция теплообменного устройства анаэробного биореактора с иммобилизованными микроорганизмами для обеспечения необходимого температурного режима работы биореактора. Данная конструкция биореактора может обеспечивать необходимую степень очистки сточной воды при значительно меньших затратах средств на строительство, эксплуатацию и материально-энергетические ресурсы. Для наглядности конструктивных особенностей было спроектировано биореактор с плоскостной нагрузкой в программном комплекте *SOLIDWORKS* и построена математическая модель процессов анаэробной очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** биореактор, сточная вода, анаэробный, микроорганизмы, иммобилизованные микроорганизмы, органические загрязнения, кинетика процесса.

### **V. MEL'NICK, O. VOROBYOVA, N. OSTAPENKO** **MODERNIZATION OF ANAEROBIC BIOREACTOR FOR WASTE WATER PURIFICATION PLANT**

Analysis of literature sources suggests that the use of anaerobic treatment methods is especially effective for high concentrations of contaminants in wastewater, as well as for large volumes of water supplied for treatment, which is typical for industrial wastewater. In biotechnological production and food industry, waste water has a high level of pollution with organic compounds, it is advisable to use anaerobic treatment methods. Anaerobic wastewater treatment processes are characterized by low energy consumption and the ability to recover energy through the combustion of methane. To ensure the required temperature regime for the operation of the bioreactor, a new design of the heat exchange device of the anaerobic bioreactor with immobilized microorganisms has been developed. This design of the bioreactor can provide the required degree of wastewater purification at significantly lower costs for construction, operation, and material and energy resources. For clarity, the design features were designed bioreactor with a plane load of bundled software *SOLIDWORKS* and a mathematical model of the processes of anaerobic wastewater treatment.

**Key words:** bioreactor, wastewater, anaerobic, microorganisms, immobilized microorganisms, organic pollution, process kinetics.

#### **Вступ**

Однією з суттєвих проблем, що виникає в технологічних процесах фармацевтичних, біотехнологічних та харчових виробництв є великі обсяги стічної води, що містять значну кількість органічних забруднень. Для вирішення цієї проблеми набули поширення процеси біологічного очищення стічної води від органічних відходів, які є одним з найбільш прогресивних, економічно ефективних та екологічно прийнятних способів запобігання забруднення навколишнього середовища. При біологічному очищенні води використовують аеробні та анаеробні процеси і обладнання для їх здійснення. Анаеробним біологічним процесам приділяють більше уваги при очистці стічних вод через високу спроможність очищати у великих концентраціях субстрату, що повільно розкладаються, отримуючи порівняно низьку концентрацію надлишкового активного мулу. Анаеробні процеси

очищення стічних вод характеризуються низькими енергозатратами та можливістю рекуперації енергії за рахунок спалювання метану. Анаеробна очистка забезпечує економічно ефективну альтернативу аеробному процесу з економією енергії, додаванням поживних речовин, об'ємом реактора, швидкою реакцією при додаванні субстрату після тривалих періодів без подачі та більших об'ємних навантажень. Крім того, анаеробний осад можна зберігати тривалий час, роблячи цей процес привабливим для сезонних операцій, наприклад, в харчовій промисловості.

Для інтенсифікації анаеробного очищення стічної води останнім часом застосовуються процеси в обладнанні з прикріпленими мікроорганізмами, які здійснюються в біореакторах з іммобілізованою (прикріпленою) мікрофлорою. Актуальним є розроблення нових конструкцій біореакторів, в яких досягається необхідний ступінь очищення стічної води за участі прикріплених мікро-

© В. М. Мельник, О. В. Воробьова, Н. В. Остапенко, 2021

рганізмів при значно менших витратах коштів на будівництво, експлуатацію та матеріально-енергетичні ресурси [1–6].

Соціальні та економічні потреби в ефективних технологіях очищення стічної води вимагають вдосконалення існуючих та створення нових конструкцій біореакторів. В сучасній практиці біологічного очищення води використовують аеробні та анаеробні процеси і обладнання для їх здійснення, анаеробна деградація забруднень має ряд переваг: менший об'єм надлишкового мулу, менші габаритні розміри очисних споруд, виробництво біогазу [7–10].

Аналіз сучасного стану очищення стічної води на очисних спорудах підприємств фармацевтичної і біотехнологічної промисловості, методів та технологічних схем очищення, показує доцільність підвищення ефективності біологічного очищення від органічних забруднень та біогенних сполук, із зменшенням витрат на будівництво та експлуатацію.

При аеробному процесі очищення стічної води необхідною умовою роботи реактора є неперервне введення кисню в процесі очищення. Це призводить до додаткових витрат і утворення великої кількості надлишкової біомаси, яку необхідно утилізувати. Анаеробні методи очищення стічної води відрізняються тим, що 90 % споживаних органічних сполук переводяться в продукти метаболізму, основною складовою яких є цінний енергоносіє – метан, і тільки 10 % – перетворюються в біомасу. Це обумовлює перспективність використання анаеробних методів очистки промислової стічної води.

Стічна вода біотехнологічних і фармацевтичних виробництв, яка утворюється або безпосередньо в процесі виробництва, або при митті технологічного обладнання, має різну ступінь забрудненості. Забрудненість стічної води органічними сполуками, виражена у величині хімічне споживання кисню (ХСК), являє собою залишки або втрати вихідної сировини, або залишки виробленого продукту, і тому такі забруднення добре розкладаються біологічним шляхом. При використанні біологічних методів потрібно розглянути, які переваги і недоліки, у тому числі і з точки зору економічної ефективності, мають анаеробний і аеробний методи очищення стічної води.

Останнім часом в літературі пропонуються комбіновані способи очищення стічної води з використанням аеробного і анаеробного очищення.

В літературі [11] запропонований спосіб глибокого біологічного очищення стічної води та станція глибокого біологічного очищення стічної води комбінованим біоценозом прикріпленої і вільноплаваючої мікрофлори, що складається з гетеротрофних і автотрофних мікроорганізмів, які діють в анаеробних, перехідних (аноксидних) і аеробних

умовах, з подальшим доочищенням в аеробному реакторі дозволяє скоротити об'єм споруд за рахунок істотного збільшення питомих швидкостей біохімічних процесів, зниження кількості утворюються в процесі обробки активного мулу і опадів при скороченні часу очищення і витрати повітря на аерацію.

В літературі [12] запропонована конструкція біофільтру з резервуаром, який розділений вертикальними перегородками, має конічне дно для збирання осаду. Перегородки утворюють центральну і радіальну секції. Одна з перегородок виконана суцільною і доходить до конусного дна, а інша розташована радіально і не доходить до перфорованого дна. Центральна секція виконана у вигляді розташованої уздовж центральної осі резервуара труби з вікном в нижній частині, що з'єднує трубу з однією з радіальних секцій. Секції забезпечені керамічної або пластикової завантаженням зі зростаючою питомою поверхнею в напрямку руху субстрату. Для забезпечення стабільного температурного режиму роботи біофільтру зовні і навколо радіальних секцій встановлений теплообмінник. Автори стверджують, що запропонована конструкція біофільтру дозволяє скоротити енергетичні витрати і підвищити ефективність процесу очищення висококонцентрованих стічних вод. Конструкція призначена для обробки стічної води сільськогосподарського виробництва, наприклад, вихідного свинячого гною.

В [13] запропонована конструкція апарату для біохімічної переробки рідких і напіврідких органічних субстратів. Апарат складається з анаеробної секції з низхідним потоком і іммобілізованої регулярної насадкы з розміщеними в нижній частині секції зонами освітлення і ущільнення біомаси із пристроєм. Зона освітлення гідравлічно з'єднана з входом анаеробного біофільтра. Анаеробний біофільтр розміщений коаксіально всередині корпусу анаеробної секції із загальною газовою частиною. Для іммобілізації біомаси в апараті передбачена регулярна насадка виконана у вигляді стрижнів з пористим покриттям.

В [14] запропонований пристрій для анаеробної і аеробної обробки концентрованих органічних рідин. Насадка для іммобілізації мікроорганізмів виконана у вигляді сукупності порожніх вертикальних стрижнів, заповнених низькокиплячою рідиною. Зовнішня поверхня кожного зі стрижнів, щонайменше в анаеробній зоні, забезпечена ребрами. Пристрій рекомендується використовувати при очищенні фугатів, насадкових рідин, фільтратів, що утворюються при механічному поділі на фракції безпідстилкового гною, посліду, осадів та мулів очисних споруд, а також для безпосередньої очистки стічної води переробної агропромислового комплексу.

Особливістю роботи біореакторів з іммобілізованою мікрофлорою є те, що на поверхні мікробної біомас внаслідок метаболізму утворюються бульбашки газу, які перешкоджають живленню мікроорганізмів. Бульбашки газу відриваються самостійно від біомаси тільки при досягненні певного розміру, що є досить тривалим процесом. При зрошенні волокон носія біомаси газові бульбашки руйнуються значно швидше. Це дозволяє збільшити поверхню контакту стічної води та мікроорганізмів і інтенсифікувати процес живлення мікроорганізмів.

Спосіб біологічного очищення стічної води розглядається в праці [15] та забезпечується роботою анаеробних та аеробних біореакторів. Використання даного способу не потребує додаткового застосування складного механічного, аераційного чи іншого обладнання. В порівнянні з відомими способами дозволяє збільшити ступінь очищення стічної води на 5 %–10 %.

В [16] запропонований пристрій для очищення стічної води. Компактність пристрою дозволяє зменшити його матеріалоемність, а також площу під забудову очисних споруд.

Відомий також [17] спосіб біологічного очищення стічної води іммобілізованими мікроорганізмами, де очищення полягає в тому, що за рахунок іммобілізації мікроорганізмів на носіях збільшується концентрація біомаси в стічній воді, тим самим, підвищується продуктивність установки в результаті збільшення окисної потужності та швидкості окиснення органічних речовини. Крім того ефективність очищення стабільна і не залежить від зміни параметрів вхідної стічної води. Введення послідовної анаеробних-аеробної обробки дозволяє отримувати енергетично корисний біогаз, стабілізований надлишково мул та стабільний ефект очищення стічної води.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що використання анаеробних методів очищення є особливо ефективним для високих концентрацій забруднень у стічній воді, а також для великих об'ємів води, яка поступає на очищення, що характерно для промислових стоків [4-6, 18-20]. В біотехнологічних виробництвах та харчовій промисловості, стічна вода має високий рівень забруднення органічними сполуками доцільно застосовувати анаеробні методи очищення. Утворений на очисних спорудах біогаз може використовуватися, наприклад, для отримання гарячої води або пари [21-22].

Перевагами анаеробних методів очищення стічної води в порівнянні з аеробними є відсутність витрат на аерацію, низька енергоемність, отримання цінного енергоносія – біогазу, мала кількість надлишкового мулу. Ступінь деградації забруднень та утвореного об'єму біогазу залежать від складу субстрату, умов протікання процесу.

Метаногенні мікроорганізми чутливі до зміни параметрів роботи біореактора: температури, швидкості подачі субстрату, тому неконтрольована зміна цих параметрів може призвести до скороченням виділення біогазу та зменшенням ступеня розкладу забруднень.

Протягом останніх десятиліть технологія анаеробного розкладу пройшла новий етап розвитку і сьогодні може розглядатись як один з найефективніших методів утилізації відходів органічного походження. Тому її належне використання повинно розглядатись як важливий інструмент енергетичної та природоохоронної політики держави.

### Мета роботи

Дослідження та модернізація анаеробного біореактору з іммобілізованою мікрофлорою для очищення стічної води та теоретичне дослідження кінетики процесу біоконверсії органічних забруднень при очищенні стічної води в анаеробному біореакторі з закріпленою мікрофлорою.

Проведення теоретичних досліджень кінетики процесу деградації органічних забруднень при очищенні води в анаеробних біореакторів з площинним завантаженням.

### Результати та обговорення

Впровадження анаеробних біореакторів подібної конструкції обмежено відсутністю науково-обґрунтованих методів їх проектування. Не в повній мірі розроблені і досліджені математичні моделі кінетики процесу деградації органічних забруднень при очищенні води, які дозволили встановити умови досягнення найвищого можливого ступеня деградації субстрату при максимальному виході біогазу в процесі метанового зброджування.

Для наглядності конструктивних особливостей спроектованого анаеробного реактора для очистки стічних вод було розроблено 3D-модель апарату за допомогою програмного забезпечення «SOLIDWORKS» (рис. 1).

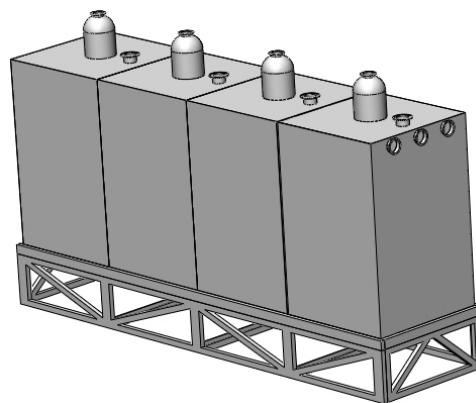


Рис. 1 – 3D-модель анаеробного біореактора

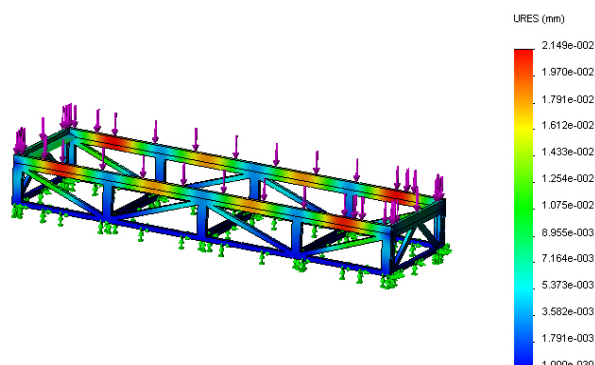


Рис. 2 – Деформація опори апарату, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

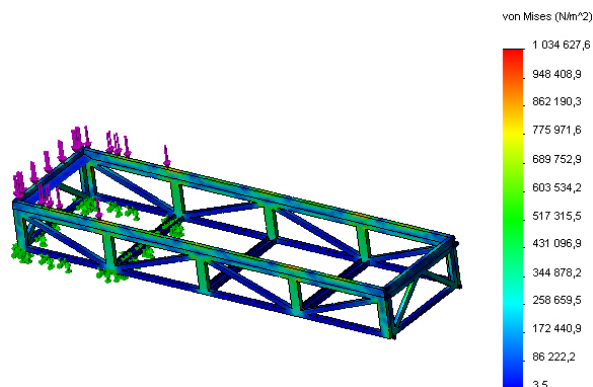


Рис. 3 – Напруження опори апарату, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

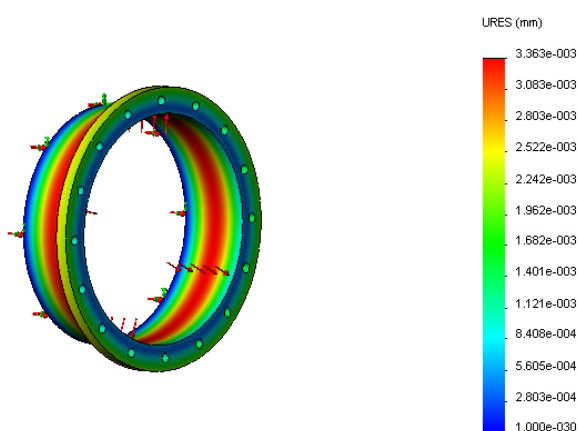


Рис. 4 – Деформація штуцера корпусу, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

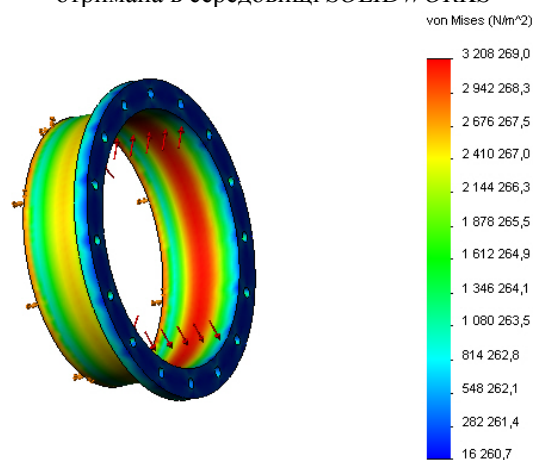


Рис. 5 – Напруження штуцера корпусу, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

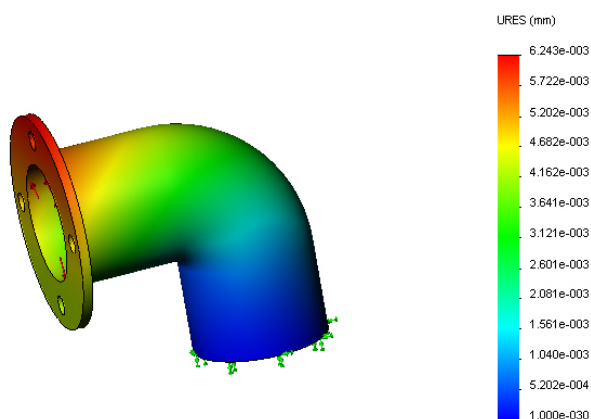


Рис. 6 – Деформація штуцера теплообмінного елемента, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

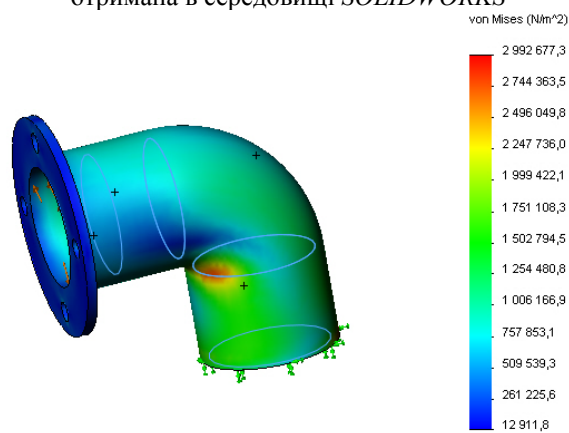


Рис. 7 – Напруження штуцера теплообмінного елемента, отримана в середовищі *SOLIDWORKS*

Завдяки моделі можна наглядно оцінити особливості конструкції, основні складальні одиниці, місця з'єднання трубопроводів та змодельовати деформації опори апарату (рис. 2–3), штуцера корпусу (рис. 4–5) і штуцера теплообмінного елемента (рис. 6–7).

За допомогою комп'ютерного моделювання напружень та деформацій конструктивних елементів

апарату можна побачити, що вони знаходяться в допустимих діапазонах.

На рис. 8 наведена принципова схема роботи анаеробного біореактора.

Стічна вода надходить в секцію знизу і висхідним потоком проходить через завантаження у вигляді вертикально розмішених полімерних листів з закріпленою на них мікрофлорою [23]. Між секціями встановлені переточки, які забезпечують

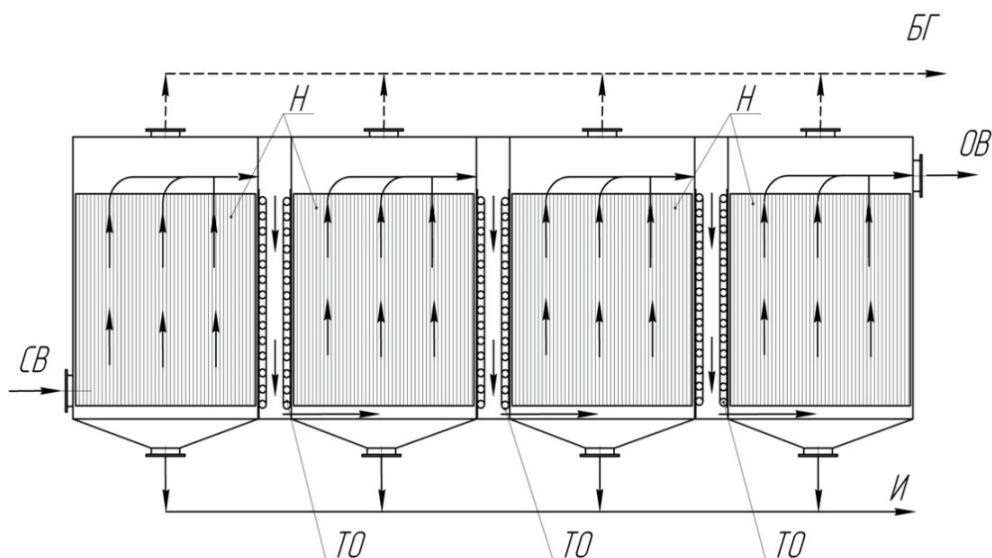


Рис. 8 – Принципова схема роботи біореактора з іммобілізованою на нерухомих носіях мікрофлорою: *CB* – стічна вода; *OB* – очищена вода; *БГ* – вихід біогазу; *Н* – блоки носіїв; *ТО* – теплообмінні пристрої; *И* – випуск відпрацьованого активного мулу

рух стічної води в наступній секції знизу вгору [24]. Поділ реактора на кілька секцій дозволяє розподілити різні бактеріальні популяції по довжині реактора. Реакційний простір може згодом розглядатися як ступінчастий анаеробний процес з ацетогенезом в першій секції і метаногенезом в кінці реактора [24]. Така організація реактора дозволяє активній біомасі краще протистояти заповним навантаженням.

Реактор використовується для першого ступеня очищення стічної води виробництва кормових дріжджів. Річна потужність виробництва 30000 т. За даними [12] на 1 т готової продукції вихід стічної води складає 45–53 м<sup>3</sup>. Тоді приймаємо добову витрату стічної води 2000 м<sup>3</sup>/доба. Температури стічної води складає 35 °С–37 °С, отже приймаємо, що у біореакторі відбувається анаеробне бродіння у мезофільному режимі при температурі середовища.

Для вибору матеріалів використовуємо технічні вимоги та технічну характеристику, яким має задовольняти апарат. Враховуючи, що тиск в апараті не перевищує 0,3 МПа, а температура 40 °С – для частин апарату, середовище у апараті є неагресивним, з нейтральним значенням рН, обираємо ГОСТ 19281-89, що є конструкційною низьколегованою сталлю для зварних конструкцій, яка не вступає в реакцію з стічною водою. Марка сталі повинна мати низький зміст вуглецю для виготовлення зварних конструкцій.

В біореакторі біомаса іммобілізована на плоских листах, розмішених в корпусі вертикально. Конструкція біореактора повинна забезпечити найбільшу продуктивність при переробці стічної води  $Q$ , м<sup>3</sup>/год для заданого ступеня очищення з

урахуванням обмежень щодо маси біореактора і габаритних розмірів.

Математичне моделювання процесу анаеробного очищення стічної води спрямоване на визначення: геометричних розмірів біореактора (ефективної довжини робочої зони біореактора  $L$ , ширини каналу, між носіями біомаси  $\delta$ ); кількості і розмірів носіїв біомаси; швидкості потоку рідини в каналі  $W_z$ ; часу перебування стічної води на очищенні.

Аналіз процесів біоконверсії органічних забруднень при анаеробному очищенні стічної води біотехнологічних виробництв виявив від 2 до 5 стадій процесу анаеробного бродіння. Для випадку очищення води з високим вмістом забруднень, які легко засвоюються мікрофлорою біореактора, запропонована двостадійна модель [25–28]:

1 стадія - забруднення, концентрацію яких приймають еквіваленту концентрації глюкози розкладаються до ацетатів (оцтової кислоти);

2 стадія - ацетати (оцтова кислота) розкладаються до біогазу.

За даної моделі мікрофлора біореактора складається з кислотогенної біомаси та метаногенної біомаси [25–28].

### Обговорення результатів

Стічна вода, з забрудненням, що можна виразити як еквівалентну концентрацію глюкози  $S_{01}$ , кг<sub>ХПК</sub>/м<sup>3</sup>, надходить знизу в першу секцію біореактора і піднімається вгору по вертикальних каналах шириною  $\delta$ , утворених плоскими носіями біомаси. Носії біомаси - це листи, виготовлені з полімерних матеріалів, на яких закріплена біоплівка (рис. 9). Органічні забруднення стічної води кислотоген-

ними мікроорганізмами біоплівки розкладаються на більш прості хімічні з'єднання, еквівалентні концентрації оцтової кислоти. Оцтова кислота в процесі життєдіяльності метаногенної мікрофлори деградує до метану і вуглекислого газу.

При побудові математичної моделі процесів в анаеробному біореакторі прийняті наступні припущення: мікроорганізми рівномірно розподілені в біоплівці, отже перетворення речовин в біореакторі відбувається рівномірно по ширині і висоті листа-носія біомаси; в усталеному процесі в біореакторі адсорбція мікроорганізмів із потоку рідини на поверхню біоплівки практично відсутня, вхідний потік рідини не містить активної біомаси, тобто кількість активної біомаси в біореакторі постійна, а кількість біомаси в біоплівці дорівнює кількості прикріпленої біомаси в реакторі; потік рідини в

каналі між носіями біомаси має ламінарний характер, локальні значення швидкості рідини в перерізі каналу близькі до середньої швидкості.

Введемо наступні позначення:

$X$  – сумарна концентрація біомаси в біоплівці;  
 $X_1$  – концентрація кислотогенної біомаси в біоплівці;

$X_2$  – концентрація метаногенної біомаси в біоплівці;

$S_{БП1}$  – середня концентрація глюкози в біоплівці;

$S_{БП2}$  – середня концентрація оцтової кислоти в біоплівці;

$S_1$  – середня по перерізу каналу концентрація глюкози в стічній воді.

Виділимо по осі  $z$  (рис. 9) відрізок  $dz$ .

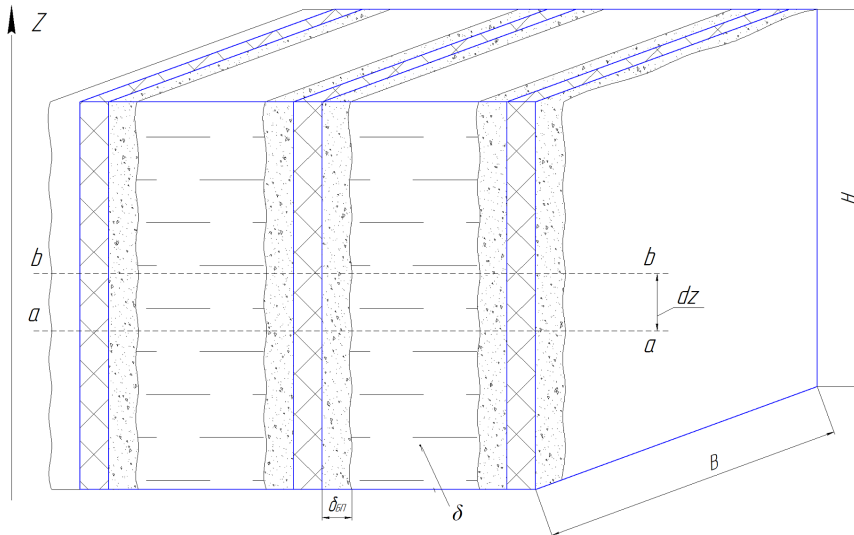


Рис. 9 – Схема розміщення біоплівки на плоских носіях

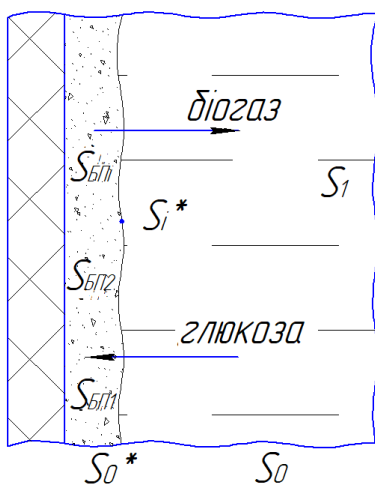


Рис. 10 – Схема перетворення глюкози в біогаз

При середньому русі рідини в каналі швидкість між листами  $W_B$

$$dz = W_B d\tau . \quad (1)$$

Напишемо вирази для визначення елементарного об'єму біоплівки та елементарного об'єму стічної води, що відповідає відрізку  $dz$ :

$$V_{БП} = \delta_{БП} B dz ; \quad (2)$$

$$V_B = \delta B dz . \quad (3)$$

Нехай маса глюкози в біоплівці в перерізі  $a-a$  (див. рис. 9) становить  $m_{БП1}$

$$m_{БП1} = \delta_{БП} B S_{БП1} dz , \quad (4)$$

а в перерізі  $b-b$  (див. рис. 9)

$$m_{БП1} + \frac{dm_{БП1}}{dz} dz . \quad (5)$$

Маса глюкози в стічній воді в перерізі  $a-a$  становить

$$m_1 = \delta B S_{1i} dz , \quad (6)$$

а в перерізі  $b-b$ :

$$m_2 = \delta B S_{1i+1} dz ;$$

$$m_2 = m_1 - 2\Delta m_{\text{БП1}};$$

$$S_{li+1} = S_{li} - \frac{2\Delta m_{\text{БП1}}}{\delta B dz}. \quad (7)$$

Приріст глюкози в біоплівці становить

$$-\frac{dm_{\text{БП1}}}{dz} dz = -\Delta m_{\text{БП1}}. \quad (8)$$

З врахуванням виразів (7) і (8)

$$\frac{dm_{\text{БП1}}}{dz} = \delta_{\text{БП1}} B \frac{dS_{\text{БП1}}}{dz} dz = \frac{\delta_{\text{БП1}} B}{W_B} \frac{dS_{\text{БП1}}}{d\tau} dz. \quad (9)$$

Зменшення кількості глюкози в біоплівці в результаті життєдіяльності кислотогенної біомаси виражається залежністю [25-28]

$$r_1 = \left( \frac{\mu_1 X_1}{Y_{X_1}} + K_{S_1} X_1 + K_{mX_1} X_1 \frac{S_{\text{БП1}}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}}} \right). \quad (10)$$

$$r_2 = Y_{S_1} X_1 \left( K_{S_1 X_1} + K_{mX_1} \frac{S_{\text{БП1}}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}}} \right) - X_2 \left( \frac{\mu_2}{Y_{X_2}} + K_{S_1 X_2} + K_{mX_2} X_2 \frac{S_{\text{БП2}}}{K_{S_2} + S_{\text{БП2}}} \right). \quad (13)$$

Тоді

$$\frac{dS_{\text{БП2}}}{d\tau} = Y_{S_1} X_1 \left( K_{S_1 X_1} + K_{mX_1} \frac{S_{\text{БП1}}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}}} \right) - X_2 \left( \frac{\mu_2}{Y_{X_2}} + K_{S_1 X_2} + K_{mX_2} X_2 \frac{S_{\text{БП2}}}{K_{S_2} + S_{\text{БП2}}} \right). \quad (14)$$

Збільшення кількості метану в результаті життєдіяльності метаногенної біомаси виражається залежністю [25-28]

$$r_3 = V_{m \max} X_2 \frac{S_{\text{БП2}}}{K_m + S_{\text{БП2}}} \frac{K_{1m}}{K_{1m} + S_{\text{БП2}}}. \quad (15)$$

Зміну маси біогазу на відрізьку  $dz$  можна знайти з залежності

$$\frac{dm_{\text{БЗ}}}{dz} = \delta_{\text{БП1}} B \frac{dS_{\text{БП3}}}{dz} dz = \frac{\delta_{\text{БП1}} B}{W_B} \frac{dS_{\text{БП3}}}{d\tau} dz. \quad (16)$$

Враховуючи, що [25-28]:

$$\frac{dS_{\text{БП3}}}{d\tau} = r_3; \quad (17)$$

$$\frac{dS_3}{d\tau} = V_{m \max} X_2 \frac{S_{\text{БП2}}}{K_m + S_{\text{БП2}}} \frac{K_{1m}}{K_{1m} + S_{\text{БП2}}}. \quad (18)$$

Глюкоза поступає в біоплівку зі стічної води.

При припущенні, що концентрація глюкози в біоплівці розподіляється за лінійним законом, на межі біоплівка-рідина концентрація приймає максимальне значення і рівна рівноважній  $S_1^*$ , а на поверхні листа дорівнює нулю. Тоді середня концентрація по товщині півки [25-28]:

$$S_1^* = S_1 \frac{\delta}{\delta + \delta_{\text{БП}}}; \quad (19)$$

$$S_{\text{БП2}i+1} = S_{\text{БП2}i} + \frac{2dz}{W_B} \left( Y_{S_1} X_1 \left( K_{S_1 X_1} + K_{mX_1} \frac{S_{\text{БП1}i}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}i}} \right) - X_2 \left( \frac{\mu_2}{Y_{X_2}} + K_{S_1 X_2} + K_{mX_2} X_2 \frac{S_{\text{БП2}i}}{K_{S_2} + S_{\text{БП2}i}} \right) \right); \quad (25)$$

$$S_{\text{БП3}i+1} = S_{\text{БП3}i} + V_{m \max} \left( X_2 \frac{S_{\text{БП2}i}}{K_m + S_{\text{БП2}i}} \frac{K_{1m}}{K_{1m} + S_{\text{БП2}i}} \right) \frac{\delta_{\text{БП1}} B dz}{W_B}. \quad (26)$$

Зміна середньої концентрації глюкози в біоплівці описується залежністю

$$\frac{dS_{\text{БП1}}}{d\tau} = - \left( \frac{\mu_1 X_1}{Y_{X_1}} + K_{S_1} X_1 + K_{mX_1} X_1 \frac{S_{\text{БП1}}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}}} \right). \quad (11)$$

Тоді

$$\frac{dm_{\text{БП1}}}{dz} = - \frac{\delta_{\text{БП1}} B}{W_B} \left( \frac{\mu_1 X_1}{Y_{X_1}} + K_{S_1} X_1 + K_{mX_1} X_1 \frac{S_{\text{БП1}}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}}} \right) dz. \quad (12)$$

Зменшення кількості оцтової кислоти в біоплівці в результаті життєдіяльності метаногенної біомаси виражається залежністю [25-28]

$$S_{\text{БП1}} = \frac{S_1^*}{2}. \quad (20)$$

Нехай для перерізу  $a-a$  (див. рис. 9):

$$S_{li}^* = S_{li} \frac{\delta}{\delta + \delta_{\text{БП}}}; \quad (21)$$

$$S_{\text{БП1}i} = \frac{S_{li}^*}{2}. \quad (22)$$

Тоді для перерізу  $b-b$  концентрація глюкози в біоплівці і стічній воді:

$$S_{\text{БП1}i+1} = S_{\text{БП1}i} - \left( \frac{\mu_1 X_1}{Y_{X_1}} + K_{S_1} X_1 + K_{mX_1} X_1 \frac{S_{\text{БП1}i}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}i}} \right) \frac{\Delta z}{W_B}; \quad (23)$$

$$S_{li+1} = S_{li} - \frac{2dz}{W_B} \left( \frac{\mu_1 X_1}{Y_{X_1}} + K_{S_1} X_1 + K_{mX_1} X_1 \frac{S_{\text{БП1}i}}{K_{S_1} + S_{\text{БП1}i}} \right). \quad (24)$$

Концентрація оцтової кислоти в біоплівці та біогазу в перерізі  $b-b$  розраховуються за рівняннями:

В кінетичних залежностях, що описують процес очищення стічної води в біореакторі з іммобілізованою мікрофлорою входять кінетичні параметри, назва і значення яких наведені в табл. 1 [25-28].

За результатами математичного моделювання процесу очищення стічної води в біореакторі з іммобілізованою біомасою були побудовані наступні залежності.

Результати розрахунків показали, що найінтенсивніше зниження концентрації глюкози і перетворення її в оцтову кислоту відбувається на висоті до 2 метрів (рис. 11), що спричиняє стрімке зростання концентрації оцтової кислоти (рис. 12).

За отриманими даними можна зробити висновок, що концентрація біогазу в біоплівці інтенсивно збільшується до середини висоти апарату, а потім накопичення відбувається несуттєво (рис. 13).

Таблиця 1 – Кінетичні параметри

Параметр	Значення
Максимальна швидкість зростання кислотогенних бактерій, год <sup>-1</sup>	0,0625
Максимальна швидкість зростання метаногенних бактерій, год <sup>-1</sup>	0,0125
Максимальний приріст біомаси кислотогенних бактерій, що споживають глюкозу, г·г <sup>-1</sup>	0,82
Максимальний приріст біомаси метаногенних бактерій, що споживають оцтову кислоту, г·г <sup>-1</sup>	0,82
Постійна напівнасичення кислотогенних бактерій, г·л <sup>-1</sup>	1,5
Постійна напівнасичення метаногенних бактерій, г·л <sup>-1</sup>	0,2
Константа насичення виробництва метану, г·л <sup>-1</sup>	0,0208
Постійна інгібування процесу виробництва метану оцтовою кислотою, г·г <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	0,504
Постійна насичення у виразі споживання глюкози для перетворення в енергію, що необхідна для підтримки життєдіяльності метаногенних бактерій, г·г <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	0,93
Постійна у виразі зростання кислотогенних бактерій, г·г <sup>-1</sup>	0,938
Постійна насичення у виразі зростання метаногенних бактерій, г·г <sup>-1</sup>	0,03
Максимальна швидкість перетворення глюкози в оцтову кислоту, г·г <sup>-1</sup>	0,83
Максимальна швидкість перетворення оцтової кислоти в метан, г·г <sup>-1</sup>	0,26
Максимальна швидкість виробництва метану 1 г метаногенними бактеріями за добу, г·г <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	0,0208

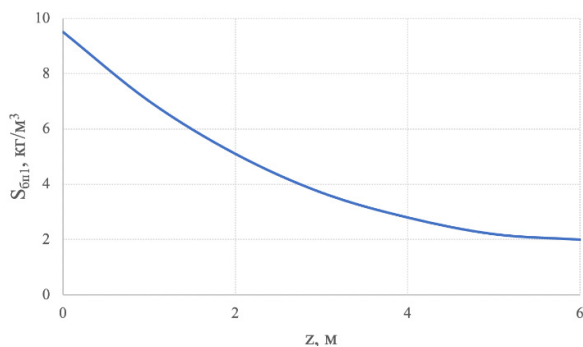


Рис. 11 – Зміна середньої концентрації глюкози по висоті біореактора

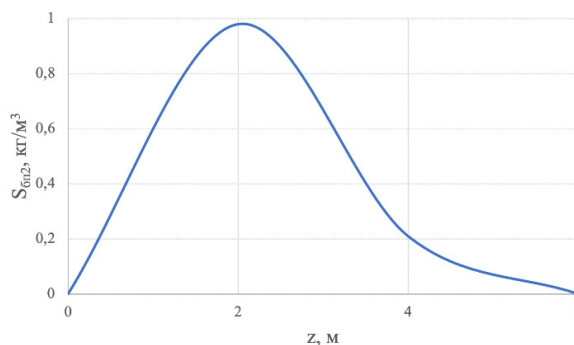


Рис. 12 – Зміна середньої концентрації оцтової кислоти в біоплівці по висоті біореактора

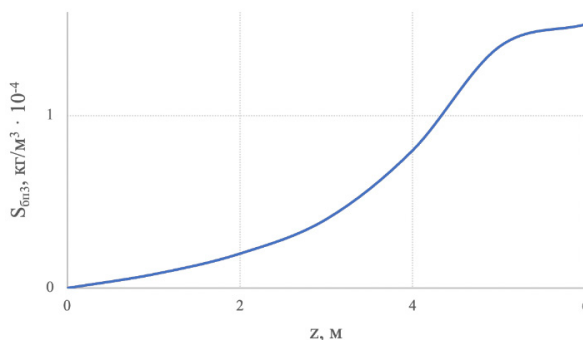


Рис. 13 – Зміна концентрації біогазу в біоплівці по висоті апарату

## Висновки

В сучасній практиці біологічного очищення води використовують аеробні та анаеробні процеси і обладнання для їх здійснення. Анаеробна деградація забруднень має ряд переваг: менший об'єм надлишкового мулу, менші габаритні розміри очисних споруд, виробництво біогазу.

Аналіз літературних джерел свідчить про перспективність застосування біореакторів з іммобілізованою мікрофлорою, в яких в якості носія використовують площинне завантаження. Такі апарати компактні, дозволяють збільшити площу і час

контакту біомаси та субстрату не зменшуючи продуктивність установки, вони прості в конструкції і регулюванні.

Для встановити умов досягнення найвищого можливого ступеня деградації субстрату при максимальному виході біогазу в процесі метанового зброджування проведено теоретичне дослідження кінетики процесу деградації органічних забруднень при очищенні води в анаеробних біореакторів з площинним завантаженням.

Розроблена математичну модель, що описує кінетику процесу деградації органічних забруднень при очищенні води в анаеробних біореакторах з площинним завантаженням. На основі математичного моделювання встановити кінетичні залежності, що описують процес очищення води в анаеробних біореакторах і проведено числове дослідження кінетики процесу деградації органічних забруднень при очищенні води в анаеробних біореакторах.

Числове дослідження проводилось для біореактора з об'ємом корпусу – 1000 м<sup>3</sup>, граничного навантаження по БСК<sub>полн</sub> – 8 кг/м<sup>3</sup>, по ХСК – 12 кг/м<sup>3</sup>, в якості завантаження використані листи з полімерного матеріалу по, поверхня завантаження – 52800 м<sup>2</sup>.

Створена комп'ютерна модель анаеробного біореактора з іммобілізованою мікрофлорою. Виконане комп'ютерне дослідження характеристик міцності та стійкості окремих елементів конструкції біореактора.

#### Список літератури

1. Мельник В. М. Аналіз існуючих біореакторів з іммобілізованими мікроорганізмами / В. М. Мельник, Л. І. Ружинська, О. В. Воробйова // Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура. – 2019. – Том 3, Вип. 149. – С. 51-57. – ISSN 2522-1809 (print). – ISSN 2522-1817 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-51-57>.
2. Ружинська Л. І. Аналітичний огляд методів очищення стічних вод в анаеробних фільтрах / Л. І. Ружинська, І. Г. Баранова // Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура. – 2009. – Вип. 86. – С. 180–185. – ISSN 2522-1809 (print). – ISSN 2522-1817 (on-line).
3. Ружинська Л. І. Дослідження процесів очищення стічних вод в анаеробних біореакторах / Л. І. Ружинська, І. Г. Баранова // Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки. – 2009. – Вип. 88. – С. 106–111. – ISSN 2522-1809 (print). – ISSN 2522-1817 (on-line).
4. Kostrytsia, A. Biofilm carrier type affects biogenic sulfur-driven denitrification performance and microbial community dynamics in moving-bed biofilm reactors / A. Kostrytsia, S. Papirio, M. Khodzhaev, L. Morrison, G. Collins, P. N.L. Lens, U. Zeeshan, G. Esposito // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287, Part 1, No. 131975. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131975>.
5. Guo Junyuan. Effective immobilization of Bacillus subtilis in chitosan-sodium alginate composite carrier for ammonia removal from anaerobically digested swine wastewater / Guo Junyuan, Chen Cheng, Chen Wenjing, Jiang Jianying, Chen Bozhi, Zheng Fei // Chemosphere. – 2021. – Vol. 284, No. 131266. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131266>.
6. Зінченко М. Г. Анаеробна біологічна очистка стічних вод виробництва цукру / М. Г. Зінченко, Є. Д. Пономаренко, Н. О. Букатенко, О. О. Голубкіна // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2020. – № 2. – С. 3-10. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0821. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2020.02.01>.
7. Ободович О. М. Нове тепломасообмінне обладнання для інтенсифікації процесу біологічного очищення стічних вод / О. М. Ободович, Л. А. Саблій, В. В. Сидоренко, М. С. Коренчук // Енергетика і автоматика. – 2017. – № 3. – С. 36-43. – ISSN 2223-0858 (on-line).
8. Саблій Л. Гідродинамічна модель біореакторів з іммобілізованими мікроорганізмами при очищенні стічних вод / Л. Саблій // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2012–2013. – Т. 10, № 4–Т. 11, № 1. – С. 36-42. – ISSN 2521-151X (print). – DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-9300112013138260>.
9. Бляшина М. В., Саблій Л. А. Анаеробно-аеробний біореактор – параметри роботи при очищенні міських стічних вод / М. В. Бляшина, Л. А. Саблій // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Технічні науки. – 2012. – № 4(60). – С. 95-100. – URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/11344> (дата звернення: 04.02.2021).
10. Chong Jun Wei Roy. Simulation and Optimisation of Integrated Anaerobic-Aerobic Bioreactor (IAAB) for the Treatment of Palm Oil Mill Effluent / Chong Jun Wei Roy, Chan Yi Jing, Chong Siewhui, Ho Yeek Chia, Mohamad Mardawani, Tan Wen Nee, Cheng Chin Kui, Lim Jun Wei // Processes. – 2021. – Vol. 9(7), No. 1124. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9071124>.
11. Эль Ю. Ф. Способ глубокой биологической очистки сточных вод и станция глубокой биологической очистки сточных вод : пат. 2225368С1 SU: МПК C02F3/30. Заявл. 18.03.2003 ; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 41.
12. Ковалев А. А., Антропов Б. В., Левчикова М. В., Мельник Р. А., Костюк В. Б., Смирнов О. П. Анаэробный биофильтр : пат. 1604750 SU: МПК C02F 3/04, C02F3/28. Заявл. 25.07.1988 ; опубл. 07.11.90, Бюл. № 41.
13. Ковалев Д. А., Камайданов Е. Н. Аппарат для биохимической переработки жидких и полужидких органических субстратов : пат. 2505488 RU: МПК C02F3/30. Заявл. 29.02.2012 ; опубл. 27.01.14, Бюл. № 3.
14. Ковалев Д. А., Камайданов Е. Н., Ковалев А. А. Устройство для анаэробной и аэробной обработки концентрированных органических жидкостей : пат. 2533801С1 RU: МПК C02F3/00 (2006.01). Заявл. 31.05.2013 ; опубл. 10.12.14, Бюл. № 32.
15. Жукова В. С., Кузьмінський Є. В., Гвоздяк П. І., Саблій М. А. Спосіб біологічного очищення стічних вод : пат. на винахід № 94856 UA: МПК C0F3/30. Заявл. 20.05.2010 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
16. Михайловський В. М., Гвоздяк П. І., Михайловська М. В., Теміров У. Б. Пристрій очищення стічних вод : пат. на винахід № 83671 UA: МПК C02F3/30. Заявл. 14.02.2006 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
17. Бляшина М. В. Спосіб біологічного очищення стічних вод іммобілізованими мікроорганізмами : пат. на винахід № 116195 UA: МПК C02F3/00. Заявл. 20. 11 2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
18. Daud M. K. Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters and Developments for Domestic Wastewater Treatment / M. K. Daud, H. Rizvi, M. A. Akram, S. Ali, M. Rizwan, M. Nafees, Z. S. Jin // Journal of Chemistry. – 2018. – 13 p. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1596319>.
19. Yousefzadeh S. A comparative study of anaerobic fixed film baffled reactor and up-flow anaerobic fixed film fixed bed reactor for biological removal of diethyl phthalate from wastewater: a performance, kinetic, biogas, and metabolic pathway study / S. Yousefzadeh, E. Ahmadi, M. Gholami, H. R. Ghaffari, A. Azari, M. Ansari, M. Miri, K. Sharafi, S. Rezaei // Biotechnol-

- ogy for Biofuels. – 2017. – No. 139. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0826-9>.
20. Гелетуха Г. Г. Перспективы развития технологий получения биогаза в Украине / Г. Г. Гелетуха, С. Г. Кобзарь // Нефть и газ. – 2001. – № 1/3. – С. 88–91.
  21. Шафаренко М. В. Дослідження процесу одержання метану з біогазу та піролізного газу / М. В. Шафаренко, О. В. Воробйова // Комунальне господарство міст: Серія: Технічні науки та архітектура. – 2021. – Т. 1, Вип. 161. – С. 280–283. – ISSN 2522-1809 (print). – ISSN 2522-1817 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-280-283>.
  22. Карп І. М. Municipal solid wastes as energy resource / І. М. Карп, К. Я. Рукань // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2019. – No. 6. – P. 49–58. – ISSN 1607-7970 (print). – ISSN 2218-1903 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.049>.
  23. Ружинська Л. І., Баранова І. Г. Завантаження для анаеробного біореактора : пат. на корисну модель 43876U UA: МПК C02 F1/04. Заявл. 23.02.2009 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17.
  24. Ружинська Л. І., Фоменкова А. А. Анаеробний біореактор для очищення стічної води : пат. на корисну модель 93476U UA: МПК C02 F11/00. Заявл. 16.12.2013 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.
  25. Ружинська Л. І. Огляд конструкцій анаеробних біореакторів / Л. І. Ружинська, А. О. Фоменкова, Є. В. Морозова // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. – 2013. – Вип. 107. – С. 330–340. – ISSN 2522-1809 (print). – ISSN 2522-1817 (on-line).
  26. Ружинська Л. І. Моделирование процессов переноса в анаэробном биореакторе с иммобилизованной микрофлорой / Л. І. Ружинська, А. А. Фоменкова // Scientific Journal “Science Rise”. – 2014. – Т. 4, № 2(4). – С. 52–58. – ISSN 2313-6286 (print). – ISSN 2313-8416 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28768>.
  27. Ружинская Л. И. Математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания органического субстрата / Л. И. Ружинская, А. А. Фоменкова // Обзор. Scientific Journal “Science Rise”. – 2014. – Т. 4, № 2(4). – С. 63–69. – ISSN 2313-6286 (print). – ISSN 2313-8416 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28767>.
  28. Velázquez-Martí B. Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process / B. Velázquez-Martí, O. W. Meneses-Quelal, J. Gaibor-Chavez, Z. Nino-Ruiz // Anaerobic Digestion. Biogas. – 2018. – ISBN 978-1-83881-851-7 (eBook). – DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>.
- References (transliterated)**
1. Mel'nick V., Ruzhinska L., Vorobiova O. (2019), “Analiz isnujucyh bioreaktoriv z immobilizovanymy mikroorganizmamy [Analysis of existing bioreactors with immobilized microorganisms]”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, vol. 3, is. 149, pp. 51–57, ISSN 2522-1809 (print), ISSN 2522-1817 (on-line), <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-3-149-51-57>.
  2. Ruzhynska L., Baranova I. (2009), “Analitichnyj ogljad metodu ochyshhennja stichnyh vod v anaerobnyh fil'trah [Analytical review of wastewater treatment methods in anaerobic filters]”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, is. 86, pp. 180–185. ISSN 2522-1809.
  3. Ruzhynska L., Baranova I. (2009), “Doslidzhennja procesiv ochyshhennja stichnyh vod v anaerobnyh bioreaktorah [Investigation of wastewater treatment processes in anaerobic bioreactors]”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, is. 88, pp. 106–111. ISSN 2522-1809.
  4. Kostrytsia, A., Papirio S., Khodzhaev M., Morrison L., Collins G., Lens P. N.L., Zeeshan U., Esposito G. (2022), “Biofilm carrier type affects biogenic sulfur-driven denitrification performance and microbial community dynamics in moving-bed biofilm reactors”, *Chemosphere*, vol. 287, part 1, no. 131975, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131975>.
  5. Guo Junyuan, Chen Cheng, Chen Wenjing, Jiang Jianying, Chen Bozhi, Zheng Fei (2021), “Effective immobilization of Bacillus subtilis in chitosan-sodium alginate composite carrier for ammonia removal from anaerobically digested swine wastewater”, *Chemosphere*, vol. 284, no. 131266, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131266>.
  6. Zinchenko M. G., Ponomarenko E. D., Bukatenko N. A., Holubkina O. A. (2020), “Anaerobna biologichna ochystka stichnyh vod vyrobnyctva cukru [Anaerobic biological wastewater treatment of sugar production]”, *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Chemistry, chemical technology and ecology*, no. 2, pp. 3–10, ISSN 2079-0821, <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2020.02.01>.
  7. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Korenchuk M. (2017), “Nove teplomasoobminne obladnannya dlja intensyfikacii' procesu biologichnogo ochyshhennja stichnyh vod [New heat and mass transfer equipment for intensification of biological wastewater treatment process]”, *Energy and automation*, no. 3, pp. 36–43, ISSN 2223-0858 (on-line).
  8. Sabliy L. (2012–2013), “Gidrodinamichna model' bioreaktoriv z immobilizovanymy mikroorganizmamy pry ochyshhenni stichnyh vod [Hydrodynamic model of bioreactors with immobilized microorganisms at wastewater treatment]”, *Water and water purification technologies. Scientific and technical news*, vol. 10, no. 4–vol. 11, no. 1, pp. 36–42, ISSN 2521-151X (print), <https://doi.org/10.20535/2218-9300112013138260>.
  9. Blyashyna M., Sabliy L. (2012), “Anaerobno-aerobnyj bioreaktor – parametry roboty pry ochyshhenni mis'kyh stichnyh vod [Anaerobic-aerobic bioreactor – operating parameters for urban wastewater treatment]”, *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, no. 4(60), pp. 95–100, Access mode: <https://ep3.nuwm.edu.ua/11344> (accessed 4 February 2021).
  10. Chong Jun Wei Roy, Chan Yi Jing, Chong Siewhui, Ho Yeek Chia, Mohamad Mardawani, Tan Wen Nee, Cheng Chin Kui, Lim Jun Wei (2021), “Simulation and Optimisation of Integrated Anaerobic-Aerobic Bioreactor (IAAB) for the Treatment of Palm Oil Mill Effluent”, *Processes*, vol. 9(7), no. 1124, <https://doi.org/10.3390/pr9071124>.
  11. Jel' Ju.F. (2004), *Sposob glubokoj biologicheskoy ochistki stichnyh vod i stancija glubokoj biologicheskoy ochistki stichnyh vod* [Deep biological wastewater treatment method and deep biological wastewater treatment plant], SU, Pat. 2225368C1. MPK C02F3/30. no. 41.
  12. Kovalev A. A., Antropov B. V., Levchikova M. V., Mel'nik R. A., Kostjuk V. B., Smirnov O. P. (1990), *Anajerobnyj biofil'tr* [Anaerobic biofilter], SU, Pat. 1604750, MPK C02F3/04, C02F3/28. no. 41.
  13. Kovalev D. A., Kamajdanov E. N. (2014), *Apparat dlja biobimicheskoy pererabotki zhidkih i poluzhidkih organicheskikh substratov* [Apparatus for biochemical processing of liquid and semi-liquid organic substrates], RU, Pat. 2505488, MPK C02F3/30, no. 3.
  14. Kovalev D. A., Kamajdanov E. N., Kovalev A. A. (2014), *Ustrojstvo dlja anajerobnoj obrabotki koncentrirovannyh organicheskikh zhidkostej*, RU, Pat. 2533801C1, MPK C02F3/00 (2006.01), no. 32.
  15. Zhukova V. S., Kuz'mins'kyj Je. V., Gvozdzjak P. I., Sabliy M. A. (2011), *Sposib biologichnogo ochyshhennja stichnyh vod* [Method of biological wastewater treatment], UA, Pat. 94856, MPK S0F3/30, no. 11.
  16. Myhajlovs'kyj V. M., Gvozdzjak P. I., Myhajlovs'ka M. V., Semirov U. B. (2008), *Prystrij ochyshhennja stichnyh vod* [Sewage treatment device], UA, Pat. 83671, MPK S02F3/30, no. 15.
  17. Blyashyna M. V. (2017), *Sposib biologichnogo ochyshhennja stichnyh vod immobilizovanymy mikroorganizmamy* [Method of biological wastewater treatment by immobilized microorganisms], UA, Pat. 116195, MPK S02F3/00, no. 9.
  18. Daud M. K., Rizvi H., Akram M. A., Ali S., Rizwan M., Nafees M., Jin Z. S. (2018), “Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters

- and Developments for Domestic Wastewater Treatment”, *Journal of Chemistry*, 13 p., <https://doi.org/10.1155/2018/1596319>.
19. Yousefzadeh S., Ahmadi E., Gholami M., Ghaffari H. R., Azari A., Ansari M., Miri M., Sharafi K., Rezaei S. (2017), “A comparative study of anaerobic fixed film baffled reactor and up-flow anaerobic fixed film fixed bed reactor for biological removal of diethyl phthalate from wastewater: a performance, kinetic, biogas, and metabolic pathway study”, *Biotechnology for Biofuels*, no. 139, <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0826-9>.
  20. Geletuha G. G., Kobzar' S. G. (2001), “Perspektivy rozvittija tehnologij poluchenija biogazu v Ukrainie [Prospects for the development of biogas technologies in Ukraine]”, *Neft' i gaz* [Oil and gas], no. 1/3, pp. 88–91
  21. Shafarenko M., Vorobyova O. (2021), “Doslidzhennja procesu oderzhannja metanu z biogazu ta piroliznogo gazu [Research of methane production process from biogas and pyrolysis gas]”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, vol. 1, is. 161, pp. 280–283, ISSN 2522-1809 (print), ISSN 2522-1817 (on-line), <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-280-283>.
  22. Karp I. M., Pyanykh K. Y. (2019), “Municipal solid wastes as energy resource”, *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 6, pp. 49-58, ISSN 1607-7970 (print), ISSN 2218-1903 (on-line), <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.049>.
  23. Ruzhyn'ska L. I., Baranova I. G. (2009), *Zavantazhennja dlja anaerobnogo bioreaktora* [Loading for anaerobic bioreactor], UA, Pat. 43876U, MPK S02F1/04, no. 17.
  24. Ruzhyn'ska L. I., Fomenkova A. A. (2014), *Anaerobnyj bioreaktor dlja ochyshhennja stichnoi vody* [Anaerobic bioreactor for wastewater treatment], UA, Pat. 93476 U, MPK S02F11/00, no. 19.
  25. Ruzhyn'ska L. I., Fomenkova A. O., Morozova Ye. V. (2013), “Ogljad konstrukcij anaerobnyh bioreaktiv [Review of structures anaerobic bioreactor]”, *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, is. 107, pp. 330–340, ISSN 2522-1809 (print), ISSN 2522-1817 (on-line).
  26. Ruzhyn'ska L. I., Fomenkova A. A. (2014), “Modelirovanie processov perenosu v anaerobnom bioreaktore s immobilizovannoj mikrofloroj [Modeling of transport processes in anaerobic bioreactor with immobilized microflora]”, *Scientific Journal “Science Rise”*, vol. 4, no. 2(4), pp. 52–58, ISSN 2313-6286 (print), ISSN 2313-8416 (on-line), <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28768>.
  27. Ruzhyn'ska L. I., Fomenkova A. A. (2014), “Matematicheskoe modelirovanie processov anaerobnogo sbrashhivaniya organicheskogo substrata. Obzor [Mathematical modeling of anaerobic fermentation processes of organic substrate. Review]”, *Scientific Journal “Science Rise”*, vol. 4, no. 2(4), pp. 63–69, ISSN 2313-6286 (print), ISSN 2313-8416 (on-line), <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28767>.
  28. Velázquez-Martí B., Meneses-Quelal O. W., Gaibor-Chavez J., Nino-Ruiz Z. (2018), “Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process”, *Anaerobic Digestion. Biogas*, ISBN 978-1-83881-851-7 (eBook), <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>.

Надійшла (received) 25.08.2021

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

**Мельник Вікторія Миколаївна (Мельник Виктория Николаевна, Mel'nick Victoria)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: vmm71@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0004-7218>.

**Воробйова Ольга Володимирівна (Воробьева Ольга Владимировна, Vorobyova Olga)** – аспірант кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: maryika050604@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2735-5904>.

**Остапенко Наталія Володимирівна (Остапенко Наталия Владимировна, Ostapenko Natalia)** – студентка кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.