

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Агрономічний факультет

Кафедра ТЗППР

Кваліфікаційна робота на правах рукопису

**ГЕРУН Олександр Сергійович**  
УДК

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**з теми: «КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ АНАЕРОБНИХ  
БІОФІЛЬТРІВ»**

201 «Агрономія»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело \_\_\_\_\_ Герун О. С.

Науковий консультант:

В.Б. Ковальов, доктор с.-г. наук,  
професор

Науковий керівник:

Тишковський В.В., кандидат с.-г. наук

**Житомир - 2020**

## ЗМІСТ

	Сторінки
Анотація	3
Вступ	4
Розділ I. Аналітичний огляд літератури	7
1.1 Порівняння аеробних і анаеробних методів очищення стічної води	11
1.2 Сучасні уявлення про процес метанового збродження.	12
Розділ II Місце, умови та методика проведення наукових досліджень	14
Розділ III Основна експериментальна частина	15
3.1 Класифікація біоенергетичних установок	17
3.2 Конструктивні особливості анаеробних біореакторів	19
3.3 Агроекологічна та енергетична ефективність анаеробних біофільтрів	25
3.4 Економічна ефективність вирощування анаеробних біофільтрів	27
Висновки та пропозиції виробництву	32
Список використаної літератури	33

## Анотація

Кваліфікаційна робота Геруна Олександра Сергійовича виконана на тему: «Конструктивні особливості анаеробних біофільтрів». Освітній ступінь «Магістр». Спеціальність 201 «Агрономія». Поліський національний університет, м. Житомир, 2020 р.

Ключові слова: біологічне очищення, анаеробний біофільтр, стічні води, біогаз.

Кваліфікаційна робота виконувалась впродовж 2019-2020 рр. на актуальну тему і присвячена вивченню біологічних особливостей анаеробних біофільтрів.

Розділ I кваліфікаційної роботи присвячений аналізу джерел наукової літератури, у якому висвітлені показники якості анаеробних біофільтрів. У розділі II наведена програма, методика та умови проведення наукових досліджень. Розділ III присвячений висвітленню питань продуктивності, агроекологічної, енергетичної та економічної оцінки ефективності використання анаеробних біофільтрів за варіантами дослідження.

Виявлено, що анаеробні методи очищення дозволяють значно скоротити затрати на експлуатацію установки, так як не потребуються затрати на аерацію середовища, значно знижуються затрати на утилізацію відпрацьованого активного мулу завдяки порівняно невеликій його кількості, знижуються витрати на обслуговування. В деяких випадках можливо отримати додатковий прибуток від використання утвореної на установці енергії. 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.

Установлено, що на ефективність очищення стічних вод у біофільтрах впливають біохімічні, масообмінні, гідравлічні і конструктивні параметри. Серед них слід відмітити: БПК стічної води, що очищається, природу органічних забруднень, швидкість окислювання, інтенсивність потоку мікроорганізмів, масу речовин, абсорбуючу плівку, товщину біоплівки, склад мікроорганізмів, що живуть у ній, інтенсивність аерації, площу і висоту біофільтра, характеристику завантаження (розмір шматків, пористість і питому поверхню), фізичні властивості стічної води, температуру процесу і гідравлічне навантаження, інтенсивність рециркуляції, рівномірність розподілу стічної води по перетину завантаження, ступінь змочування біоплівки.

Проведене числове дослідження впливу температури, швидкості рідини, параметрів субстрату та біомаси на радіус відриву бульбашки біогазу на основі розв'язку математичної моделі утворення та відриву бульбашки біогазу на поверхні біоплівки в анаеробному біофільтрі з площинним завантаженням, що описує процес у нерухомому середовищі та при постійному введенні рідини у біофільтр висхідним потоком.

Створена комп'ютерна модель анаеробного біофільтру. При навантаженні елементів виявилось, що умова стійкості та міцності виконується. Деформації конструктивних елементів в допустимих діапазонах.

З розрахунків стартап-проекту очевидно, що впровадження нової бізнес-ідеї позитивно відображається на розвитку галузі біологічного очищення промислових стічних вод за рахунок того, що зменшується собівартість готового апарату анаеробного біофільтра.

#### **Anotation**

Qualification work of Gerun Alexander Sergeevich is executed on a theme: "Design features of anaerobic biofilters". Educational degree "Master". Specialty 201 "Agronomy". Polissya National University, Zhytomyr, 2020

Key words: biological treatment, anaerobic biofilter, wastewater, biogas.

Qualification work was performed during 2019-2020 on a topical issue and is devoted to the study of biological features of anaerobic biofilters.

Section I of the qualification work is devoted to the analysis of sources of scientific literature, which highlights the quality of anaerobic biofilters. Section II presents the program, methods and conditions of scientific research. Section III is devoted to the issues of productivity, agroecological, energy and economic evaluation of the efficiency of anaerobic biofilters according to the experimental variants.

It was found that anaerobic treatment methods can significantly reduce the cost of operating the plant, as it does not require the cost of aeration of the environment, significantly reduces the cost of disposal of spent activated sludge due to its relatively small amount, reduces maintenance costs. In some cases, it is possible to get additional income from the use of energy generated at the installation. The use of anaerobic treatment methods is particularly effective for high concentrations of contaminants in wastewater, as well as for large volumes of water entering the treatment, which is typical of industrial effluents.

It is established that the efficiency of wastewater treatment in biofilters is influenced by biochemical, mass transfer, hydraulic and design parameters. Among them it should be noted: BOD of treated wastewater, the nature of organic contaminants, oxidation rate, flow rate of microorganisms, mass of substances, absorbent film, biofilm thickness, composition of microorganisms living in it, aeration intensity, area and height of biofilter characteristics (piece size, porosity and specific surface area), physical properties of wastewater, process temperature and hydraulic load, recirculation intensity, uniformity of wastewater distribution along the cross section of the load, the degree of wetting of the biofilm.

A numerical study of the effect of temperature, fluid velocity, substrate and biomass parameters on the radius of biogas bubble separation based on the solution of the mathematical model of biogas bubble formation on the biofilm surface in a plane-loaded anaerobic biofilter describing the process in a stationary medium and with constant introduction fluid in the biofilter upstream.

A computer model of an anaerobic biofilter has been created. When loading the elements, it turned out that the condition of stability and strength is met. Deformation of structural elements in admissible ranges.

From the calculations of the startup project it is obvious that the introduction of a new business idea has a positive effect on the development of biological treatment of industrial wastewater due to the fact that the cost of the finished device anaerobic biofilter.

## Вступ

**Актуальність теми дослідження.** 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.

Сучасні розробки в області інтенсифікації анаеробних процесів фокусуються на стабілізації метаногенезу та зменшенні габаритів установки. Перспективним напрямом є дослідження анаеробних біофільтрів, що відрізняються компактністю, підвищеною стійкістю проти негативних впливів та високою ефективністю.

**Метою досліджень** полягає у підвищенні ефективності анаеробних біофільтрів для очищення стічної води. Проведені математичні та комп'ютерні дослідження показали, що запропонована конструкція є ефективнішою за стандартні та може бути використана при конструюванні нового обладнання або вдосконаленні вже існуючого.

**Об'єкт дослідження** – слугує анаеробний біофільтр.

**Предмет дослідження** є процеси гідродинаміки в анаеробному біофільтрі з площинним завантаженням.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Оцінено ефективність конструктивних особливостей анаеробних біофільтрів.

**Методи досліджень.** Польовий- для аналізу взаємодії об'єкта вивчення з досліджуваними факторами; вегетаційний – для проведення фенологічних спостережень; лабораторний – аналізи рослинних зразків; розрахунково-порівняльний – для економічного і біоенергетичного аналізів; статистичний – для визначення кореляційних зв'язків і їх тісноти, а також для визначення достовірності відмінностей.

## Перелік публікацій автора за темою дослідження:

1. Коваль В.В., Панасюк Т.Л., Герун О.С., БондарТ.Л. - магістри. ВПЛИВ НОРМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ НА УРОЖАЙНІСТЬ ЖИТА ОЗИМОГО.

Агросфера – частина біосфери. (Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених, збірник 1).- ПОЛІСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ, 2020.- С. 87-88.

2. Зубро Д.І. Зубко Я.В, Рудник А.В., Герун О.С., БондарТ.Л. - магістри. ВПЛИВ СПОСОДІВ ОБРОБІТКУ ГРУНТУ НА ЗАБУРЯНЕНІСТЬ ЛЮПИНУ ЖОВТОГО В УМОВАХ ПОЛІССЯ ЖИТОМИРЩИНИ.

Сільське господарство – сталий розвиток України (Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених, збірник 2).- ПОЛІСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ, 2020.- С.

3. Коваль В.В., Панасюк Т.Л., Герун О.С., БондарТ.Л. - магістри. Вплив добрив на якісні показники урожаю жита озимого.

Інновації та розвиток агросектору (Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених, збірник 3).- ПОЛІСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ, 2020.- С.

4. Зубро Д.І. Зубко Я.В, Рудник А.В., Панасюк Т.Л. Герун О.С., БондарТ.Л.- магістри. Стан посівів та урожайність зеленої маси люпину жовтого при різних способах обробітку ґрунту.

Інновації та розвиток агросектору (Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених, збірник 3).- ПОЛІСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ, 2020.- С.

**Практичне застосування результатів.** Результати досліджень можуть бути використані сільськогосподарськими підприємствами різних форм власності при розробці високоефективних технологій використання різних форм альтернативних добрив.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення і результати досліджень доповідалися та обговорювалися на: засіданнях наукового гуртка, всеукраїнських та студентських конференціях агрономічного факультету.

**Структура та обсяг роботи.** Робота містить 30 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі 3 розділи, 14 таблиць, 4 рисунки. Список використаної наукової літератури налічує 30 джерел. У додатках наведено статистичну обробку за варіантами досліджу.

## **Розділ I. Аналітичний огляд літератури**

### **1.1 Порівняння аеробних і анаеробних методів очищення стічної води**

Стічна вода біотехнологічних чи харчових 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 ХСК, являє собою залишки або втрати вихідної сировини, або залишки виробленого продукту, і тому такі забруднення добре розкладаються біологічним шляхом. Для очищення такої стічної води, як і для будь-якої іншої стічної води, необхідно вибрати оптимальний метод обробки. При використанні біологічних методів насамперед потрібно розглянути, які переваги і недоліки, у тому числі і з точки зору економічної ефективності, мають анаеробний і аеробний методи очищення стічної води [1].

При аеробному процесі очищення стічної води необхідною умовою роботи реактора є неперервне введення кисню під час ферментації. Це призводить до додаткових витрат і, незважаючи на те, що процес деструкції органічної речовини відбувається активніше, ніж при анаеробному зародженні, у результаті біоконверсії утворюється велика кількість надлишкової біомаси, ставлячи проблему її утилізації. Анаеробні методи переробки 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.

Анаеробні методи очищення дозволяють значно скоротити затрати на експлуатацію установки, так як не потребуються затрати на аерацію середовища, значно знижуються затрати на утилізацію відпрацьованого активного мулу завдяки порівняно невеликій його кількості, знижуються витрати на обслуговування. В деяких випадках можливо отримати додатковий прибуток від використання утвореної на установці енергії.

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.

Анаеробні біофільтри стійкі до залпових викидів стічної води, а також зберігають свою працездатність при тривалій відсутності надходження свіжого субстрату, що характерно для циклічного виробництва.

Так як при анаеробних процесах використовуються закриті ємкості, знижуються викиди шкідливих речовин в атмосферу, тобто такі виробництва є більш екологічними.

Вагомим недоліком існуючих анаеробних процесів очищення стічної води є низька продуктивність за вилученням ХСК у порівнянні з аеробними процесами.

На відміну від аеробних, анаеробні методи очищення не дозволяють видалити сполуки азоту та фосфору. Таким чином, для очищення промислової стічної води в багатьох випадках доцільно використовувати комбіновані аеробно-анаеробні процеси. На першому етапі при високій концентрації

органічної речовини використовується анаеробне очищення, яке дозволяє знизити рівень ХСК на 70-80%. Подальше доочищення стічної води проводиться на установках аеробного очищення. Саме такий підхід використовується сучасними компаніями, які займаються біологічною очисткою стічної води, як BIOMAR, Німеччина [1]. Також, наведене порівняння особливо ясно показує, що в біотехнологічних виробництвах та харчовій промисловості, де стічна вода високо забруднена органічними сполуками, застосування анаеробних методів очищення особливо вигідно. Утворений на очисних спорудах біогаз ефективно використовувати, наприклад, для отримання гарячої води або пари, то очисні споруди можуть функціонувати з прибутком. Анаеробні установки особливо підходять для стічної води з високим значенням ХСК і БСК. При особливо жорстких вимогах до якості очищених стічної води, особливо при скиданні очищеної стічної води у поверхневі водойми, можливо поєднання анаеробного і аеробного очищення. Такі очисні споруди надійно функціонують в різних кліматичних умовах [1]. Ступінь деградації забруднень та утвореного об'єму біогазу залежать від складу субстрату, умов протікання процесу. Слід зазначити, що метаногени виявляють значну чутливість до змін робочих параметрів, таких як зміна температури або швидкості подачі субстрату, реагуючи на них скороченням виділення біогазу та зменшенням ступеня розкладу забруднень, що призводить до інгібування інших біохімічних процесів надлишком неперероблених речовин. Разом з тим, анаеробні методи очищення стічної води відрізняються відсутністю витрат на аерацію та низькою енергоємністю, що доповнюється отриманням цінного енергоносія та малою кількістю надлишкового мулу.

Сучасні розробки в області інтенсифікації анаеробних процесів фокусуються на стабілізації метаногенезу та зменшенні габаритів установки. Перспективним напрямом є дослідження анаеробних біофільтрів, що відрізняються компактністю, підвищеною стійкістю проти негативних впливів та високою ефективністю [2].

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.

## **1.2 Сучасні уявлення про процес метанового збродження**

Розпад органічних речовин при метановому збродженні являє собою складний анаеробний процес, який здійснюється в результаті життєдіяльності мікроорганізмів. Бродиння називається метановим, так як остання стадія здійснюється метаноутворюючими бактеріями, а одним з основних кінцевих продуктів розпаду органічної речовини є метан [3]. Отже, як кінцевий продукт після метанового збродження маємо біогаз, який представляє собою суміш газів, основними складовими якої є метан (50-87%), вуглекислий газ (13-50%), та інші домішки в незначних кількостях. За складом та кількістю домішок біогази різного походження неоднакові.



Мікробний синтез біогазу здійснюється консорціумом різноманітних мікроорганізмів, серед яких присутні продуценти метану як основної складової утвореного газу. Для метанового бродіння характерний широкий спектр споживаних речовин. Практично всі органічні сполуки, хоча й різною мірою, піддаються метановому бродінню, причому утворюються одні і ті ж кінцеві продукти.

Утворення метану з органічних відходів відбувається в результаті життєдіяльності декількох основних груп мікроорганізмів: гідролітиків, кислотоутворюючих бактерій, які перетворюють складні органічні сполуки в прості, які, в свою чергу, є джерелом живлення для метаноутворюючих бактерій. Метаноутворюючі бактерії більш чутливі до змін навколишнього середовища, ніж кислотоутворюючі, тобто метаноутворення є лімітуючою стадією процесу анаеробного зброджування [3].

Метаноутворюючі бактерії складають фізіологічно однорідну групу, але характеризуються великою різноманітністю морфологічних типів, з яких можна виділити чотири основних: палички, коки, вібріони і спірили [3].

З біохімічної точки зору метанове бродіння представляє собою анаеробне "дихання", в ході якого електрони з органічної речовини переносяться на вуглекислий газ, який в подальшому відновлюється до метану. Крім різних органічних субстратів (таких, як оцтова кислота) донорами електронів для метаноутворюючих бактерій слугує водень, який продукується декількома типами анаеробних бактерій. Для всіх метанобактерій характерна здатність до росту в присутності водню і вуглекислого газу, а також висока чутливість до кисню і інгібіторів виробництва метану. В даний час відомо близько 40 видів метаноутворюючих бактерій.

Найбільш важливим субстратом для метаноутворюючих бактерій є ацетат, з якого при розкладанні складних органічних речовин утворюється більше 40% метану. Метаногенні бактерії 90-95% використуваного вуглецю перетворюють в метан і лише 5-10% вуглецю переходить в біомасу. Завдяки цьому до 80-90% органічних речовин, що розкладаються в процесі розвитку метаногенного консорціуму, перетворюється в газ, а кількість утвореної біомаси набагато менша, ніж при аеробному процесі очищення, що значно понижує затрати на утилізацію відпрацьованого мулу.

Дослідники [3] вважають, що в процесі анаеробного розкладання органічної речовини слід виділяти три основні стадії, які протікають під впливом трьох фізіологічних груп бактерій.

Три стадії анаеробного розпаду органічної речовини.

На першій стадії складні багатовуглецеві речовини, які представляють собою основні класи органічних сполук (білки, жири, полісахариди), піддаються ферментативному гідролізу так званими "первинними" анаеробами.

Одночасно під дією мікроорганізмів відбувається гідроліз моносахаридів, органічних кислот і спиртів. В результаті утворюються водень, вуглекислий газ, низькомолекулярні жирні кислоти, спирти і деякі інші сполуки. У здійсненні цієї стадії беруть участь анаеробні бактерії: Clostridium,

Bacteroides, Rumicoccus, Butyrivibrio, а також факультативні анаероби: Escherichiacoliu Bacillus [3].

На другій стадії ацетогенні мікроорганізми, такі як Syntrophobacter, Syntrophomonas, Desulfovibrio ферментують більш складні речовини в низькомолекулярні органічні кислоти, а так само  $H_2$  і  $CO_2$ . Ацетогенні бактерії включають в себе як облигатні, так і факультативні види. Крім того, на цій стадії діють також гомоацетогенні бактерії, які зброджують одно- і багатовуглецьмісткі з'єднання тільки до оцтової кислоти без утворення водню [3].

На третій стадії процесу подальший розпад органічних речовин здійснюється метаноутворюючими і сульфатредуючими мікроорганізмами, які використовують для підтримки своєї життєдіяльності метаболіти, що утворилися на попередніх стадіях. У здійсненні цієї стадії беруть участь анаеробні бактерії: *Methanosarcina*, *Methanoplasma*, *Methanosaeta*, тощо.

Автори [3] виділяють 5 стадій метаногенезу :

1. Дезінтеграція, коли складні клітинні освіти розпадаються на окремі біополімери: білки, ліпіди, полісахариди та ін.;
2. Гідроліз складних біополімерних молекул (білків ліпідів, полісахаридів та інших) на простіші: амінокислоти вуглеці, жирні кислоти та ін.;
3. Ферментація (бродиння) утворилися мономерів до ще більш простих речовин: низьких кислот і спиртів, при цьому виділяється також діоксид вуглецю і водень;
4. Ацетогенез, коли утворюються безпосередні попередники метану: ацетат, водень, вуглекислота;
5. Метаногенез, в процесі якого з'являється кінцевий продукт розкладання складних органічних речовин – метан.

## Розділ II Місце, умови та методика проведення наукових досліджень

Річна потужність виробництва кормових дріжджів 30000т. За даними [21] на 1т готової продукції вихід стічної води складає 45-53м<sup>3</sup>. Тоді риймаємо добову витрату стічної води 4000м<sup>3</sup>/доба. Характеристика стічної води виробництва кормових дріжджів приведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристика стічної води виробництва кормових дріжджів

Параметр	Величина
Витрата стічної води, м <sup>3</sup> /доба	4000
Температура (°C) рН	35 – 37
Органічні речовини (кг/м <sup>3</sup> )	4 – 4,5
Мінеральні речовини (кг/м <sup>3</sup> )	7– 10
Суспензована речовина (кг/м <sup>3</sup> )	2 – 4
ХСК (кгО <sub>2</sub> /м <sup>3</sup> )	1 – 2
БСК <sub>5</sub> (кгО <sub>2</sub> / м <sup>3</sup> )	6– 11
Органічні кислоти (кг/м <sup>3</sup> )	2,5 – 5
Феноли (кг/м <sup>3</sup> )	0,2 – 0,5
Загальний азот (кг/м <sup>3</sup> )	0,0011 – 0,023
Фосфор (кгP <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /м <sup>3</sup> )	0,2 – 0,7

Очисні споруди включають ступінь механічної обробки, змішувач-усереднювач, два анаеробні біофільтри, які працюють паралельно, аеробний біореактор, вторинний освітлювач, станцію дозування реагентів, станцію зневоднення осаду на стрічковому фільтрпресі, біофільтр для очищення вихідного повітря.

Попередньо крупні механічні домішки, що містяться у стічній воді, видаляються на барабанних решітках РБ1, РБ2. На первинному відстійнику ВПЗ відбувається видалення легкоосаджувальних домішок. Змішувач-осереднювач ЗУ4 забезпечує накопичування та перемішування стоку, а також попереднє біологічне закисання органічних речовин, що сприяє більш ефективній біологічній обробці у подальшому. Також до змішувача-осереднювача ЗУ4 додається луг для доведення рН стоку до нейтрального. Основним елементом системи очистки стічної води є блок анаеробних реакторів БАН9, БАН10, працюючих паралельно. Для оптимальної роботи реактора автоматично регулюються витрата води, температура, рН. У результаті анаеробного очищення органічні сполуки розпадаються до метану та вуглекислого газу. Біогаз, який містить 75-80% метану, поступає до когенераційної установки, де біогаз спалюється з виділенням теплової та електричної енергії, за рахунок якої забезпечується функціонування установки. У анаеробних біофільтрах здійснюється очищення стічної води від 6,5 кгХСК/м<sup>3</sup> до 0,975 кгХСК/м<sup>3</sup>, тобто забезпечується ступінь очищення 85%. Аеробне доочищення стічної води відбувається в аеробному реакторі АТ29. У анаеробних біофільтрах здійснюється очищення стічної води від 0,975 кгХСК/м<sup>3</sup> до 0,3 кгХСК/м<sup>3</sup>, тобто забезпечується загальна ступінь очищення

стічної води 95,4%. Очищений стік освітлюється на вторинному відстійнику ВВ30. З вторинного відстійника вода самопливом поступає до міської каналізації. Осад з первинного відстійника ВПЗ, анаеробних біофільтрів БАН9, БАН10, вторинного відстійника ВВ30 за допомогою фекальних насосів Н12, Н13, Н15, Н33, Н34 подається на ступінь зневоднення осаду. При цьому осад з анаеробних біофільтрів БАН9, БАН10 збирається у Зб11, осад з відстійників ВПЗ, ВВ30 – у Зб14, з яких періодично завантажується до змішувача З18, до якого також подається флокулянт. Зі змішувача З18 осад поступає на стрічкових фільтрпрес ФС19. Зневоднений осад підлягає утилізації, вода з фільтрпресу поступає на очищення у аеробний реактор АТ29.

Повітря для аерації до аеротенку подається за рахунок вентиляторів В24, В26, В28. Повітря забирається з атмосфери за допомогою повітрозбірників ПЗ23, ПЗ25, ПЗ27. Відпрацьоване повітря очищується на біофільтрі БФ38 та викидається в атмосферу.

### **Конструктивні особливості анаеробного біофільтра Порівняльний аналіз основних показників конструкції з діючими аналогами**

Реактор для біоконверсії анаеробним бродінням органічних речовин в потоці рідини, який включає в себе: ємність, що має стінки зверху, знизу і збоку, які огорожують заданий об'єм; вхідний отвір, передбачений в ємності, через який потік рідини надходить в апарат, вихідний отвір, передбачений в ємності, через який потік рідини виходить з апарату, безліч перегородок, поміщених в ємність, розміщених паралельно на відстані одна від одної. Перегородки поділяють ємність на відсіки з висхідним і низхідним потоком. Об'єм відсіку з низхідним потоком менше об'єму відсіку з висхідним потоком. Під час експлуатації потік рідини проходить від нижньої частини відсіку з низхідним потоком, через проточний перекриття надходить у відсік з висхідним потоком. Перегородки запобігають циркуляції мікроорганізмів в ємності, так що мікроорганізми зберігаються в реакторі, в той час як потік рідини циркулює по резервуару. 2) Метантенк для анаэробной обработки органических отходов: пат. 2408546 С2. Ru: МПК С02F3/00 (2006.01), С02F11/04 (2006.01) / Ковалев Дмитрий Александрович (RU), Камайданов Евгений Николаевич (RU) : заявитель и патентообладатель Российская Академия Сельскохозяйственных наук Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ) (RU). Винахід відноситься до області природоохоронної техніки з переважним використанням у сільському господарстві. Метантенк включає корпус циліндричної форми, патрубки підведення вихідних та відведення оброблених відходів, патрубок відведення біогазу, центральну трубу з порожнистою стінкою і з патрубками для підведення і відведення теплоносія, патрубок для підведення біогазу, вертикально орієнтовані засоби іммобілізації анаеробної мікрофлори у вигляді сукупності вертикальних стрижнів з пористою структурою. Сукупність вертикальних стрижнів об'єднана у верхній частині за

допомогою жорсткої рамної підвіски і виконана з можливістю реверсивного обертання всередині кільцевого простору метантенка, утвореного центральною трубою і циліндричною стінкою метантенка. Циліндрична стінка метантенка забезпечена гріючою сорочкою.

Верхня частина корпусу метантенка забезпечена кільцевими гідрозатворами і електромеханічним приводом, пов'язаним через жорсткий вал з жорсткою рамною підвіскою. Жорсткий вал герметично пов'язаний з занурювальним ковпаком гідрозатвору. Винахід дозволяє інтенсифікувати теплообмін між теплоносієм і біомасою, знизити нерівномірність нагріву біомаси, інтенсифікувати масообмін між вихідним субстратом і анаеробної мікрофлорою.

Винахід відноситься до реакторів і методам анаеробної очистки стічної води. Реактор виконаний з внутрішнім контуром циркуляції з центральним проточним каналом. У кільцевому просторі між центральним проточним аналом і стінкою реактора встановлені несучі елементи для іммобілізації мікроорганізмів. Між суміжними несучими елементами є шляхи протікання. Нижня частина реактора під несучими елементами виконана у вигляді простору, призначеного для прийому стічної води з плаваючими в них мікроорганізмами. При роботі реактора передбачені як плаваючі, так і іммобілізовані на несучих елементах мікроорганізми. Стічна вода, що очищується, тече по центру вниз і вздовж несучих елементів знову вгору, причому течія створюється частково за рахунок утворення мікроорганізмами газу. Реактор може бути використаний також і для очищення стічної води в харчовій і комбікормовій промисловості, а також у паперовій та текстильній промисловості. Використання винаходу дозволить підвищити якість очищення стічної води.

Завантаження для біофільтрів, виконане у вигляді еластичних смуг з синтетичного матеріалу, що закріплені поруч одна біля одної на несучих рамах, яке відрізняється тим, що рами разом з еластичними смугами виконані у вигляді окремих блоків завантаження із зазорами між ними. Ряди блоків із завантаженням розташовані у шаховому порядку, паралельно один відносно одного. Смуги завантаження виконані у вигляді пучків пружних волокон.

В результаті проведених патентних досліджень встановлено, що останнім часом винахідницька активність промислово розвинутих країн у природоохоронній галузі, де використовуються анаеробні реактори для очищення стічних вод, зокрема біофільтри, залишається стабільною. При цьому вдосконалення існуючих конструкцій ведеться у сфері об'єднання переваг різних конструкцій реакторів, вдосконаленні конструктивних елементів анаеробних біофільтрів, зокрема завантаження та газовідділяючих пристроїв. У розробці нових апаратів активну участь приймає і Україна. При цьому запатентовані винаходи й корисні моделі стосуються як апаратів в цілому, так і його складових частин.

## **Розділ III Основна експериментальна частина**

### **3.1 Класифікація біоенергетичних установок**

Анаеробний процес проходить в біоенергетичних установках (БЕУ), які є складною системою технологічних процесів як фізико-хімічної, так і біологічної природи (процеси, пов'язані з життєдіяльністю мікроорганізмів). Постійний прогрес технології анаеробного розкладу приводить до розвитку нових технічних рішень в цій сфері, зокрема, одноємнісні типи біореакторів замінюють на багатоемнісні, одностадійні схеми процесу — на двостадійні, поряд із технологічними схемами з високою одиничною потужністю застосовують модульні установки тощо. Швидкий прогрес технології вимагає аналізу і узагальнення наявних знань про процес, виконання класифікації для системного підходу в подальших дослідженнях. БЕУ поділяють за декількома основними ознаками [1].

Основним технічним елементом (вузлом) БЕУ є біореактор, тому основні технічні відмінності між ними передовсім впливають на технічні рішення, застосовані у побудові біореактора і навпаки. Отже, розглянемо основні типи біореакторів, які використовуються для анаеробної переробки органічних відходів [1].

#### **Конструктивні особливості анаеробних біореакторів**

Конструктивні особливості анаеробних біореакторів обумовлені видом та обсягами відходів, що переробляються, необхідним ступенем деградації, місцем анаеробного біофільтра у технологічній схемі очищення. Найбільш загальноприйнята класифікація анаеробних реакторів заснована на формі макроструктур метаногенів біомаси в них.

За цим принципом всі конструкції можна розділити на реактори з вважено-седиментованою біомасою (мулом) і прикріпленою біомасою (біоплівкою). Прикладом першого типу реакторів є традиційний метантенк, анаеробна лагуна, контактний реактор, UASB - реактор з висхідним потоком рідини через шар анаеробного мулу, EGSB - реактор з розширеним шаром гранульованого мулу, перегородковий реактор (ABR). До другого типу відносяться реактори з низхідним потоком (DSFF-реактор), реактор з псевдозрідженим шаром (AFB), біологічні фільтри тощо. Ряд конструкцій – анаеробний біофільтр з висхідним потоком (AF) та гібридний реактор (AF+UASB) – поєднують у собі елементи обох типів реакторів [9]. Також автори [9] розглядають три покоління у розвитку конструкцій анаеробних біореакторів. Перше покоління включає в себе апарати, в яких біомаса суспензована, самими примітивними з яких є септики, реактори Imhoff, анаеробні лагуни. Введення перемішування призвело до створення конструкцій реакторів з безперервним перемішуванням. Їх основне застосування полягає в обробці осаду, отриманого від станцій аеробного очищення активним мулом [9].

Анаеробна лагуна (Anaerobic lagoon) – один з найпростіших анаеробних біореакторів, процес деструкції забруднень відбувається з порівняно низькою швидкістю, потік субстрату контактує із гранулами біомаси, що осідають на дні біореактора. Придатні для переробки відходів із навантаженням від 0,1 до 2

кгХСК/(м<sup>3</sup>добу). Конструкція відрізняється простотою і економічністю, придатністю до переробки різних видів відходів, в тому числі і висококонцентрованих. Завдяки великому об'єму біореактора незначні кількості інгібіторів розчиняються, не справляючи значного впливу на життєдіяльність мікрофлори. Разом з тим, значні обсяги біореактора потребують великих площ для розміщення, процес мало піддається контролю і не відрізняється інтенсивністю [3]. Анаеробна лагуна

Перше удосконалення подібних реакторів полягало у введенні декантатора на виході з реактора, а також у рециркуляції біомаси. Час гідравлічного перебування складає близько від 5 до 10 днів. Застосування цієї технології особливо бажано, коли стічна вода містить тверді частинки, які важко перетравлюються і легко осаджуються [9].

Традиційний метантенк. Вживані протягом тривалого часу конструкції метантенків являють собою залізобетонні або сталеві вертикальні резервуари циліндричної форми з жорстким перекриттям і конічним або плоским днищем. Метантенк з механічним перемішувачем: СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу. Резервуари забезпечуються різними системами обігріву та перемішування і системою відведення, збору і утилізації біогазу. Для запобігання кіркоутворення застосовують резервуари з вузькою горловиною і невеликою площею поверхні зброджуваного осаду, що дозволяє підвищити інтенсивність газовиділення. Як варіанти циліндрових метантенків в різні роки розроблялися конструкції метантенків з рухомим куполом, наприклад, метантенки з плаваючим перекриттям і метантенки-газгольдери. Проте, ці споруди не отримали широкого поширення. Для поєднання процесів зброджування і ущільнення в одній споруді розроблені спеціальні конструкції метантенків-ущільнювачів. Корпуси метантенків виконані з залізобетону із задалегідь напруженою арматурою. Найкращі показники досягнуті в метантенках яйцевидної форми, що забезпечує мінімальні витрати залізобетону і мінімальні тепловтрати. Крім того, така форма метантенка перешкоджає накопиченню піску та утворенню кірки [9].

Контактний реактор (Anaerobic Contact Reactor) представлений нарисунком 1.7. Процеси, що відбуваються у контактному реакторі значною мірою відбуваються завдяки наявності активного мулу. Контактний реактор встановлюють разом із відстійником, куди направляється відпрацьована біомаса. У реакторі встановлюють систему дегазації, яка видаляє утворені гази, попереджаючи винос ними флокул активного мулу. Контактні реактори відрізняються високою концентрацією активного мулу, і, відповідно, високою швидкістю переробки та коротким часом перебування маси у реакторі. Реактори контактного принципу дії призначені для переробки стічної води, яка має здатність до розшарування концентрацією від 4 до 30 г/л. Перевагами такого типу реакторів є використання стандартного обладнання, достатньо висока якість переробки, можливість успішного керування процесом. Недоліками можна вважати рівномірний розподіл інгібіторів по всьому об'єму реактора, порівняно невисоку концентрацію стічної води, придатної до переробки [3].

Контактний реактор: СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу; Р – рециркуляція Перегородчастий реактор (Buffled Reactor). Ця конструкція відрізняється простотою і широкими можливостями вдосконалення, найчастіше, це впровадження різного типу завантажувальних, теплообмінних пристроїв та елементів для виведення біогазу з усього об'єму апарата [12].

Перегородчастий реактор: СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу До біореактора постійно подається стічна вода, при чому кожна нова порція витісняє попередню. Потік поступово проходить крізь так звані мулові камери у строго ламінарному режимі, залишаючи шар активного мулу на дні, газ виводиться із верхніх газових секцій. Камера розташовується під певним невеликим кутом для забезпечення самовільного току.

У другому поколінні реакторів використовується збереження біомаси всередині реактора без необхідності рециркуляції. Можна навести приклад анаеробного фільтра, який є реактором, заповненим природним носієм (гравієм) або синтетичним (кілець ПВХ і т.п.), завантаження може бути упорядкованим або ж насипний. Обмеження цих методів в основному пов'язано з наявністю зважених часток у стічній воді, яка підлягає очистці, що викликають засмічення завантаження. З іншого боку, процеси із закріпленою біомасою загалом мають кращу резистивність до токсичних стоків і вони швидко адаптуються до зміни складу харчування [9]. Отже, сутністю анаеробного біофільтра та головною відмінністю його від інших анаеробних біореакторів є наявність завантаження з інертного носія, розміщеного у біофільтрі без можливості виносу його потоком рідини, що протікає. На носіїві утворюється біоплівка, з якою контактує субстрат. Анаеробні біофільтри класифікують за напрямом потоку субстрату, конструкцією завантаження та матеріалом носія. Організація руху рідини в анаеробному фільтрі визначає не тільки конструктивне оформлення установки, а і кількість та активність біомаси, якість та швидкість обробки, обсяги біогазу, що виділяється. Найчастіше застосовують анаеробні фільтри із низхідним та висхідним потоками, їх схеми показано – Анаеробні фільтри: а – із низхідним потоком; б – із висхідним потоком; СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу; Р – рециркуляція Анаеробні фільтри з низхідним потоком та нерухомо закріпленою біоплівкою DSFF (Downflow Stationary Fixed Film reactor). Стічна вода подається в верхню частину реактора і, протікаючи крізь шар завантаження, видаляються знизу. До переваг даної конструкції можна віднести простоту, оскільки правильно розташований реактор не потребуватиме застосування насосного обладнання.

Перемішуванню біомаси в реакторі сприятимуть два зустрічні потоки: потік стічної води згори донизу і бульбашки біогазу, що піднімаються вгору. Характерною рисою таких фільтрів є присутність біомаси, переважно, у формі біоплівки, тому важливим аспектом проектування анаеробних фільтрів із низхідним потоком є вибір носія із потрібними поверхневими властивостями. Найчастіше застосовують м'які матеріали із високою внутрішньою пористістю не менше 200 м<sup>2</sup> на один кубічний метр об'єму завантаження. Слід зазначити, що вихід біогазу та його якість можуть бути дещо нижчими у порівнянні із



іншими анаеробними біореакторами, оскільки виведення газу ускладнюється формою завантаження і зустрічним потоком рідини, а час перебування газу виявляється дещо тривалішим.

Анаеробні фільтри з висхідним потоком АФ (Anaerobic Filter). Принципову схему анаеробного фільтра із висхідним потоком. Стічна вода поступає в нижню частину реактора і піднімається вгору, біогаз виводиться з верхньої частини реактора. Фільтри такої конструкції відрізняються повнотою використання поверхні носія. Крім того, біомаса присутня не тільки у вигляді біоплівки, а і у флокулах та гранулах [14]. Циркуляція рідини за рахунок висхідних потоків забезпечує рівномірність розподілу біомаси і не допускає виникнення застійних зон або областей із підвищеним вмістом кислот. Потік також перешкоджає заростанню дна анаеробного фільтра та його засміченню [7].

Для запобігання накопиченню мулу всередині реактора ван ден Бергом і Ленцем був розроблений трубчастий реактор із закріпленою плівкою, який представляє собою біофільтр із площинним завантаженням. Реактор може бути з висхідним або з низхідним потоком. Носій, який може бути використаний, являє собою труби або пластини, розташовані таким чином, щоб створювати вертикальні канали. Застосовуване навантаження складає до 30 кгХСК/(м<sup>3</sup>сут). Така форма завантаження, до того ж, сприятиме більш повному виведенню біогазу з об'єму анаеробного фільтра [7]. Використання анаеробних біофільтрів особливо ефективно при очищенні стічної води, що містить ліпофільні речовини (жири), такі біореактори підходять для роботи з різкими коливаннями концентрації забруднюючих речовин у стічній воді та найчастіше використовуються при очищенні стічної води молочної, текстильної, м'ясопереробної промисловостей [2]. Інший реактор другого покоління, розроблений групою голландців під керівництвом Леттінга принцип роботи якого заснований на самоімобілізації біомаси у вигляді гранул (гранульований мул) з хорошими декантаційними характеристиками і високою метаногенною активністю. [9].

Це апарати з висхідним потоком рідини зі зваженим гранульованим шаром мулу "UASB" (Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor) – реактор із висхідним потоком рідини крізь шар активного анаеробного мулу.

Схема UASB-реактора: СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу. Оскільки реактор не вимагає внутрішнього заповнення для закріплення біомаси, це економічно привабливо, але характеристики його роботи залежать від грануляції біомаси. Крім того, UASB-реактор має у своїй верхній частині систему розділу газ-рідина-тверде тіло, яка запобігає або обмежує винесення зважених часток і сприяє виведенню газу і декантації мулу. Розділення газу, очищеної води та гранульованої біомаси здійснюється за допомогою спеціального мулогазовідділюючого пристрою. Утримання гранульованої біомаси здійснюється також завдяки її високій седиментаційній здатності. UASB-реактори виявляють значну чутливість до складу стічної води, особливо наявності в ній твердих речовин та інгібіторів, проте, є порівняно компактними та простими, забезпечують хороші умови перемішування, високу

якість переробки. Завдяки зазначеним перевагам UASB-реактори є найбільш поширеними. Характерною особливістю цієї конструкції реактора є наявність щільного шару мулу внизу реактора та зони з розрідженими концентраціями біомаси [9]. Застосовувані органічні навантаження можуть досягати значення до 40 кгХСК/(м<sup>3</sup>сут), для часу гідравлічного перебування порядку декількох годин залежно від характеру стоків, що підлягають очищенню. Так само, як анаеробні фільтри, UASB-реактори отримали широке поширення в промисловості на рівні очищення агро-харчових стоків. Такі біореактори показують високу продуктивність при вмісті у воді речовин, що добре розлагаються біологічним шляхом, окрім ліпофільних речовин, та застосовуються при обробці стоків індустрії напоїв, целюлозно-папірової промисловості тощо [2]. Тим не менш, явище грануляції мулу не повністю вивчено, і робить процес у UASB-реакторах важким у застосуванні, коли виробництво не має відповідне джерелом посівної культури, наприклад мулу з іншого працюючого UASB-реактора. Однак, деякі стоки легко привести до утворення гранульованого мулу, такі, як стоки цукрової промисловості. В даний час дослідження, засновані на розумінні механізмів грануляції були здійснені, але так як проблема є надзвичайно складною, на сьогоднішній день немає загальної теорії грануляції, а наявні дані не завжди добре корелюють між собою. Виробництво гранульованого мулу є здебільшого емпіричним ноу-хау, ніж істинно науковим підходом: мало хто може тепер похвалитися, що має можливість виробляти гранульований мул на замовлення [9]. Також розроблені гібридні конструкції, які об'єднують, наприклад, відповідні переваги UASB-реактора і анаеробного фільтра: реактор UBF (Upflow Bed-Filter) [7]. Нижня частина складається з гранульованого шару мулу і верхня частина містить твердий носій. Така конструкція дозволяє більш раціонально використовувати обсяг реактора, досягти високої концентрації біомаси, хороших умов перемішування, високу продуктивність, компактність та простоту конструкції. Верхня частина реактора, зазвичай, 25%-30 % об'єму, заповнена інертним носієм, закріпленим, або таким, що плаває. Таким чином вдається уникнути характерного для анаеробного фільтра засмічення нижніх шарів носія та зменшити його кількість.

Процеси третього покоління включають зрідження мікробного шару на синтетичному або природному носії. Реактор з псевдозрідженим шаром характеризується ступенем псевдозрідження більше 50%, а реактори з розширеним шаром мулу - ступенем псевдозрідження близько 20%. Площа контакту носія дуже велика (більше 200 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), при проведенні процесу відбувається активне перемішування, що усуває проблеми підведення субстрату. Час гідравлічного перебування становить менше 12 годин. Однак, ці реактори споживають більше енергії і технічно перевершують попереднє покоління, тобто мають більш складну конструкцію. Застосовувані органічні навантаження можуть перевищувати 40кгХСК/(м<sup>3</sup>сут) [13]. Біореактор із розширеним і зваженим шаром активного мулу (Expanded G Sludge Bed Reactor, EGSB). Принциповою відмінністю даного типу реакторів від UASB-реактора є більша швидкість висхідного потоку рідини за рахунок рециркуляції

для інтенсифікації масообміну між гранулами мулу та стічної водою. За поширенням ця високоінтенсивна конструкція поступається лише UASB-реакторам.

Біореактор із розширеним шаром активного мулу: СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу; Р – рециркуляція. Такі реактори придатні для переробки низькоконцентрованих стоків у широкому діапазоні температур [3]. Біореактор із псевдозрідженою біомасою (рисунок 1.12) (Fluidized Bed Reactor) – один із найбільш продуктивних біореакторів із закріпленою мікрофлорою за рахунок більш повного контакту забруднень із біомасою.

Реактор з псевдозрідженим носієм: а – з висхідним потоком; б – з нисхідним потоком; СВ – вхід стічної води; ОВ – вихід очищеної води; БГ – вихід біогазу; Р – рециркуляція. Псевдозрідження відбувається за рахунок висхідного потоку рідини та бульбашок біогазу, що виділяється. При цьому значно збільшується поверхня контакту між активною біомасою та необробленими відходами. В таких біореакторах обробляють низькоконцентровані стоки із розчиненими або дрібнодисперсними забрудненнями. Однак, підтримка псевдозрідженого шару потребує значних енерговитрат [10]. Різноманітність складу та властивостей стічної води не дозволяють однозначно якісно та кількісно порівняти різні конструкції анаеробних біореакторів. В залежності від характеристик стоку та місцевих кліматичних та соціально-економічних умов оптимальною може стати будь-яка конструкція з вищеописаних систем. [10]. Найважливіші параметри роботи основних конструкцій анаеробних реакторів наведені у таблиці 1.2.

**Таблиця**

**Характеристики основних типів анаеробних біореакторів**

Покоління	Назва біореактора	Продуктивність, кг(м3/добу)	Мінімальне навантаження, кг/м3	Час гідравлічного перебування, год	Ефективність очищення %
1	2	3	4	5	6
I	Метантенк	10	0,5-5	240-360	60-80
	Контактний анаеробний реактор	1-8	2	24-120	70-95
	Перегородчастий анаеробний реактор	1-7	2,5	48-72	75-90
	Анаеробний біофільтр з нисхідним	3-15	1	12-90	80-95

II	ПОТОКОМ				
	Анаеробний біофільтр з висхідним потоком	5-20	0,2	10-85	80-95
	Анаеробний біореактор з висхідним потоком рідини зі зваженим шаром мулу	2-30	0,3	2-72	80-95
III	Анаеробний біореактор з розширеним шаром активного мулу	8-40	0,3	1-24	70-85
	Анаеробний біореактор з псевдо зрідженим шаром активного мулу	8-70	0,3	1-4	80-95

***Порівняння основних типів анаеробних біореакторів за питомою продуктивністю.***

***Особливості носіїв мікрофлори***

Як показано в [6, 7], значний вплив на продуктивність реактора має вибір матеріалу і конфігурації носія мікрофлори. Так, наприклад, використання в якості носія синтетичної бахромистої тканини дозволяє в 4 рази підвищити продуктивність реактора по біогазу в порівнянні з носієм з гранул активованого вугілля [11]. Для утримання біомаси в біофільтрі використовують так звані носії, які виготовляються з різних матеріалів. До матеріалу носія пред'являються такі вимоги [12]:

- Біосумісність з мікроорганізмами біоплівки, не викликаючи інгібування процесів їх росту і метаболізму;

- Відсутність взаємодії з субстратом, продуктами життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу, а так же хімічна стійкість до тривалого впливу агресивного середовища;
- Висока пористість, питома поверхня і шорсткість, що забезпечують найкращу адсорбції клітин активного мулу, при чому розмір пор повинен перевищувати середній розмір мікроорганізмів, тобто 1-4мкм, так як при менших значеннях розміру пір біоплівка утворюється суто на поверхні носія, роблячи непотрібним його мікропористу структуру. Необхідне значення пористості носія для зниження ризику замулювання має бути вище 90% [12];
- Механічна міцність, що забезпечує надійність конструкції при збільшенні кількості біомаси на носії.

В якості матеріалу носія може використовуватися металева сітка, капронові волокна, пенька, скловолокно, активоване вугілля та інші матеріали, проте останні дослідження показують перспективність використання полімерних матеріалів в якості носія [11]. В сучасних біофільтрах широке використання отримали носії, виготовлені з пластичних мас у вигляді кілець, волокон (так звана неупорядковане завантаження), плоских і гофрованих листів, труб, сіток (орієнтоване завантаження) та ін. Хороші результати показують носії з полістиролу, полівінілхлориду. Представлені найбільш поширені типи носіїв мікрофлори в анаеробних біофільтрах. Приклади завантажень, які використовуються у якості носіїв мікрофлори: а – Flocor ®; б – Cloisonyle ®; в – Bioflow 30, Raushert ®; Bioflow 9, Raushert ® Гідродинамічні і теплові режими роботи біофільтрів в значній мірі впливають на ефективність очищення води і на продуктивність анаеробних біофільтрів по біогазу. Так, при мезофільному процесі перепад температур в біофільтрі не може перевищувати 1° С. Враховуючи, що біодеградація органічних забруднень води протікає зі значним виділенням теплової енергії, забезпечення ефективного теплообміну в апаратах з невпорядкованим завантаженням проблематично. Використання орієнтованого завантаження у вигляді плоских аркушів дозволяє регулювати гідродинамічні і теплові режими роботи біофільтра.

#### **Вибір дослідної конструкції біофільтра**

Таким чином, для вирішення задач очищення промислової стічної води найбільш поширене використання реакторів типів: перегородчастого, UASB, ESGB, анаеробного біофільтра, реактора з псевдо зрідженим шаром. Доцільно використання анаеробного біофільтра з висхідним потоком рідини з площинним орієнтованим завантаженням, так як:

1. Площинне орієнтоване завантаження забезпечує рівномірне розподілення стоків і в наслідок цього більш повне використане корисного об'єму реактора.
2. Використання площинного завантаження дозволяє організувати практично рівноцінні умови масообміну по всій поверхні біоплівки.
3. Така конструкція сприяє якісному закріпленню мікрофлори на поверхні носія, суспендовані клітини знаходяться у реакторі у незначній кількості і, як наслідок, зменшується винесення активної біомаси з реактора.
4. Даний тип реакторів поступає ESGB-реакторам, а також реакторам з псевдо зрідженим шаром мулу за рядом показників, а саме:

- продуктивності;
- гранично допустимій концентрації ХСК у стоках;
- мінімальному часу перебування;
- концентрації біомаси.

Однак, аналіз показує, що для обробки стоків підприємства з виробництва кормових дріжджів з утворенням 4000м<sup>3</sup>/доба стічної води забрудненістю 6,5кгХСК/(м<sup>3</sup> доба) при відсутності жорстких обмежень за часом обробки, використання конструкції анаеробного біофільтра є економічно вигідним за рахунок зниження вартості реактора та експлуатаційних затрат. На основі проведеного аналізу запропонована конструкція анаеробного біофільтра.

#### Принципова схема біофільтра.

Принцип роботи пристрою наступний: стічна вода поперемінно протікає по відсікам реактора, при контакті з біоплівкою, що закріплена на нерухомих носіях, органічні речовини, що містяться у стічній воді, піддаються анаеробній деградації. При проходженні робочих камер стічна вода має висхідний потік, що сприяє більш інтенсивному відриву газових бульбашок від матеріалу носія. У перетоках, що являють собою теплообмінні секції, температура стічної води доводиться до температури процесу. Утворений біогаз відводиться за допомогою газовідвідних пристроїв 6 як показано на зображенні (рисунок 1.13), які також являють собою бризкоуловлювачі для відділення крапель рідини, що захвачені потоком біогазу. При накопиченні у нижній частині робочих камер відпрацьованого активного мулу, він відводиться через штуцери 7.

#### Принципова схема біофільтра:

1 – секції реактора; 2 – перетоки; 3 – завантаження; 4 – вхідний штуцер; 5 – вихідний штуцер; 6 – газовідділюючий пристрій; 7 – штуцер для виведення відпрацьованого мулу. Розділення біофільтра на декілька секцій дозволяє розподілити різні бактеріальні популяції по довжині реактора. Реакційний простір може згодом розглядатися як 2-х ступінчастий анаеробний процес з ацетогенезом в першій секції і метаногенезом в кінці реактора. Така організація реактора.

### **3.3 Агроекологічна та енергетична ефективність роботи анаеробних біофільтрів**

Очисні споруди включають ступінь механічної обробки, змішувач-осереднювач, два анаеробні біофільтри, які працюють паралельно, аеробний біореактор, вторинний освітлювач, станцію дозування реагентів, станцію зневоднення осаду на стрічковому фільтрпресі, біофільтр для очищення видхідного повітря.

Попередньо крупні механічні домішки, що містяться у стічній воді, видаляються на барабанних решітках РБ1, РБ2. На первинному відстійнику ВПЗ відбувається видалення легкоосаджувальних домішок. Змішувач-осереднювач ЗУ4 забезпечує накопичування та перемішування стоку, а також попереднє біологічне закисання органічних речовин, що сприяє більш ефективній біологічній обробці у подальшому. Також до змішувача-осереднювача ЗУ4 додається луг для доведення рН стоку до нейтрального.

Основним елементом системи очистки стічної води є блок анаеробних реакторів БАН9, БАН10, працюючих паралельно. Для оптимальної роботи реактора автоматично регулюються витрата води, температура, рН. У результаті анаеробного очищення органічні сполуки розпадаються до метану та вуглекислого газу. Біогаз, який містить 75-80% метану, поступає до когенераційної установки, де біогаз спалюється з виділенням теплової та електричної енергії, за рахунок якої забезпечується функціонування установки. У анаеробних біофільтрах здійснюється очищення стічної води від 6,5 кгХСК/м<sup>3</sup> до 0,975 кгХСК/м<sup>3</sup>, тобто забезпечується ступінь очищення 85%. Аеробне доочищення стічної води відбувається в аеробному реакторі АТ29. У анаеробних біофільтрах здійснюється очищення стічної води від 0,975 кгХСК/м<sup>3</sup> до 0,3 кгХСК/м<sup>3</sup>, тобто забезпечується загальна ступінь очищення стічної води 95,4%. Очищений стік освітлюється на вторинному відстійнику ВВ30. З вторинного відстійника вода самопливом поступає до міської каналізації. Осад з первинного відстійника ВПЗ, анаеробних біофільтрів БАН9, БАН10, вторинного відстійника ВВ30 за допомогою фекальних насосів Н12, Н13, Н15, Н33, Н34 подається на ступінь зневоднення осаду. При цьому осад з анаеробних біофільтрів БАН9, БАН10 збирається у Зб11, осад з відстійників ВПЗ, ВВ30 – у Зб14, з яких періодично завантажується до змішувача З18, до якого також подається флокулянт. Зі змішувача З18 осад поступає на стрічкових фільтрпрес ФС19. Зневоднений осад підлягає утилізації, вода з фільтрпресу поступає на очищення у аеробний реактор АТ29.

Повітря для аерації до аеротенку подається за рахунок вентиляторів В24, В26, В28. Повітря забирається з атмосфери за допомогою повітробірників ПЗ23, ПЗ25, ПЗ27. Відпрацьоване повітря очищується на біофільтрі БФ38 та викидається в атмосферу.

Таблиця 3.3.4

Енергетична ефективність роботи анаеробних біофільтрів  
(середнє за 2019-2020рр.)

№ п/п	Варіанти	Продукти в- ність, м <sup>3</sup> /добу	Енергія, акумуляована	Енерговит рати	Коефіцієнт енергетичної ефективності (K <sub>ee</sub> )
			мДж/га		
1.	Метантенк контроль	10	40500	21870	1,2
2.	Анаероб- ний біореактор з розшире- ним шаром активного мулу	40	54300	22425	2,4
3.	Анаероб- ний біо- реактор з псевдо зрідженим шаром активного мулу	70	58500	22500	2,6

Із даних таблиці видно, що залежно від варіанту дослідження енергія змінюється від – 40500 до 58500 мДж/га. При цьому коефіцієнт енергетичної ефективності (K<sub>ee</sub>) збільшується від –1,2 до 2,6.

Найбільший коефіцієнт енергетичної ефективності отримуємо у варіанті 3.

### 3.4 Економічна ефективність роботи анаеробних біофільтрів

В період економічної кризи і відсутності коштів для придбання необхідної техніки для сільськогосподарського виробництва, закупівлі добрив та насіння, різко знизилась рентабельність вирощування різних сільськогосподарських культур в колективних і індивідуальних господарствах. Особливі затрати несуть товаровиробники при системі захисту від шкідників і хвороб.

У результаті проведених патентних досліджень встановлено, що останнім часом винахідницька активність промислово розвинутих країн у природоохоронній галузі, де використовуються анаеробні реактори для очищення стічних вод, зокрема біофільтри, залишається стабільною. При цьому



вдосконалення існуючих конструкцій ведеться у сфері об'єднання переваг різних конструкцій реакторів, вдосконаленні конструктивних елементів анаеробних біофільтрів, зокрема завантаження та газовідділяючих пристроїв. У розробці нових апаратів активну участь приймає і Україна. При цьому запатентовані винаходи й корисні моделі стосуються як апаратів в цілому, так і його складових частин.

Стічна вода очищується, вступаючи в кожен із секцій знизу і висхідним потоком проходячи через завантаження з фіксованою на ній мікрофлорою. Між секціями встановлені перетоки, які, в свою чергу, грають роль теплообмінних пристроїв. Поділ реактора на кілька секцій дозволяє розподілити різні бактеріальні популяції по довжині реактора. Реакційний простір може згодом розглядатися як декілько ступінчастий анаеробний процес з ацетогенезом в першій секції і метаногенезом в кінці реактора. Така організація реактора дозволяє активній біомасі краще протистояти залповим навантаженням. Реактор використовується для першого ступеня очищення стічної води виробництва кормових дріжджів. Річна потужність виробництва 30000т. За даними [21] на 1т готової продукції вихід стічної води складає 45-53м<sup>3</sup>. Тоді приймаємо добову витрату стічної води 4000м<sup>3</sup>/доба. Температур а стічної води складає 35-37°C, отже приймаємо, що у біофільтрі відбувається анаеробне бродіння у мезофільному режимі при температурі середовища  $t_{сер} = 35^{\circ}C$ . Про що свідчать дані таблиці 3.4.

Економічна ефективність роботи анаеробних біофільтрів  
(середнє за 2019-2020 рр.)

№ п/п	Варіанти	Продуктивність, м <sup>3</sup> /добу	Вартість очистки, грн/доба	Затрати на роботу анаеробних біофільтрів, грн/доба	Чистий прибуток, грн/доба	Окупність витрат, раз
1.	Метантенк контроль -	10	6050	4500	1550	1,3
2.	Анаеробний біореактор з розширеним шаром активного мулу	40	8430	3500	4930	2,4
3.	Анаеробний біореактор з псевдо зрідженим шаром активного мулу	70	9850	3400	6450	2,9

Аналіз даних таблиці показує, що використання сучасних анаеробних біофільтрів дасть можливість отримати чистий прибуток від – 1550 до - 6450 гривень/добу, а окупність затрат від – 1,3 до – 2,9 раз.

## **Висновки та пропозиції виробництву**

1. Виявлено, що анаеробні методи очищення дозволяють значно скоротити затрати на експлуатацію установки, так як не потребуються затрати на аерацію середовища, значно знижуються затрати на утилізацію відпрацьованого активного мулу завдяки порівняно невеликій його кількості, знижуються витрати на обслуговування. В деяких випадках можливо отримати додатковий прибуток від використання утвореної на установці енергії. 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.

2. Установлено, що на ефективність очищення стічних вод у біофільтрах впливають біохімічні, масообмінні, гідравлічні і конструктивні параметри. Серед них слід відмітити: БПК стічної води, що очищається, природу рганічних забруднень, швидкість окислювання, інтенсивність потоку мікроорганізмів, масу речовин, абсорбуючу плівку, товщину біоплівки, склад мікроорганізмів, що живуть у ній, інтенсивність аерації, площу і висоту біофільтра, характеристику завантаження (розмір шматків, пористість і питому поверхню), фізичні властивості стічної води, температуру процесу і гідравлічне навантаження, інтенсивність рециркуляції, рівномірність розподілу стічної води по перетину завантаження, ступінь змочування біоплівки.

3. Проведене числове дослідження впливу температури, швидкості рідини, параметрів субстрату та біомаси на радіус відриву бульбашки біогазу на основі розв'язку математичної моделі утворення та відриву бульбашки біогазу на поверхні біоплівки в анаеробному біофільтрі з площинним завантаженням, що описує процес у нерухомому середовищі та при постійному введенні рідини у біофільтр висхідним потоком.

4. Створена ком'ютерна модель анаеробного біофільтру. При навантаженні елементів виявилось, що умова стійкості та міцності виконується. Деформації конструктивних елементів в допустимих діапазонах.

З розрахунків стартап-проекту очевидно, що впровадження нової бізнес-ідеї позитивно відображається на розвитку галузі біологічного очищення промислових стічних вод за рахунок того, що зменшується собівартість готового апарату анаеробного біофільтра.

## Список використаної літератури

1. Зінченко В.О. Методи отримання біогазу [Текст] / В.О. Зінченко, В.П. Кусайло // Вісник ДАУ №2 – Житомир: Національний агроекологічний університет, 2005.– 100с.
2. Ружинська Л.І. Аналітичний огляд методів очищення стічних вод в анаеробних фільтрах [Текст] / Л.І. Ружинська, І.Г. Баранова // навчально-технічний збірник – Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2009.– 100с.
3. Шеїна О.О. Біохімія процесу виробництва біогазу як альтернативне джерело енергії [Текст] / О.О. Шеїна, В.О. Сисоєв // Вісник природних та технічних наук – Тамбов: Тамбовський університет, 2009.– 150с.
4. Гаазе З.В. Особливості виробництва біогазу в установках з двома біореакторами [Текст] / З.В. Гаазе, А.Л. Межевич, О.Н. Бузиян // Вісник красноярського державного аграрного університету - Красноярськ, 2012. – 200с.
5. Carlos Hernandez, Salvador. Strategie de commande integree intelligente de procedes de traitement des eaux usees parla digestion anaerobie: Salvador Carlos Hernandez. – Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 2005. – 158 с.
6. Cresson Romain. Etude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation. Impact des conditions hydrodynamiques et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du biofilm: дис. док. техн. наук/ Romain Cresson. – Montpellier II, 2006. – 272 с.
7. Курис Ю.В. Особенности технологии и методы интенсификации анаэробного сбраживания [Текст] / Ю. В. Курис, С.І. Ткаченко, А.Ю. Майстренко // Наука – науковотехнічному прогресу в паливно-енергетичному комплексі – 2008. – №11. – с. 35-41.
8. Michaud M. Sébastien. Etude hydrodynamique et biologique d'un procede de methanisation a biofilm : le reacteur a lit turbule inverse: дис.... д-ратехн. наук / M. Sébastien Michaud. L'institut National Des Sciences Appliquees De Toulouse, 2001. – 174 с.
9. Ружинська Л.І. Огляд конструкцій анаеробних біореакторів [Текст] / Л.І. Ружинська, А.О. Фоменкова, Є.В. Морозова // навчально-технічний збірник – Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2013.– 400с.
10. Колесников В.П. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях [Текст] / В.П. Колесников, Е.В. Вильсон // под ред. Ак. ЖКХРФВ.К. Гордеева-Гаврикова. – Ростов-на-Дону: Юг, 2005. – 212 с
11. Lardon Laurent. Modélisation des biofilms de digestion anaérobie par système multi-agents: Mémoire de DAA / Laurent Lardon. – Montpellier: AgroTIC, 2001. – 79с.
12. Marchaim Uri. Les procédés de production de biogaz pour le développement de technologies. Bulletin des services agricoles de la FAO, 95.

– Rome: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. – 1994. – 223 с.

13. Математична модель зростання бульбашок біогазу в біореакторах с закріпленою біоплівкою Восточно-европейский журнал передових технологій. №1/8 (55), 2012, Харьков. Фоменкова А.О. Ружинська Л.І.

14. Young J.C. Design considerations for full-scale anaerobic filters / James C. Young, Byung S. Yang // Journal WPCF. – 1987. – V. 61, No9. – P. 1576-1587.

15. В.С. Дубровский Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов [Текст] / Дубровский В.С., Виестур У.Э. — Рига: Зинатне, 1988. — 204 с.

16. Крупский К.Н. Использование биогаза в качестве источника энергии: Обзорная информация [Текст] / К.Н. Крупский, Е.Н. Андреев, А.С. Ютина // М. ЦБНТИ Минжилкомхоза РСФСР, 1988. – 43 с

17. Федоткин И.М. Пленочные теплообменные аппараты и пути интенсификации теплообмена в них [Текст] / И.М. Федоткин, В.Р. Фирисюк – Киев: УкрНИИНТИ, 1969 – 91 с

18. Гюнтер Л.И. Метантенки [Текст] / Л.И. Гюнтер, Л.Л. Гольдфарб – М.: Стройиздат, 1991. – 128 с.

19. Титов А.И. К вопросу утилизации биогаза метантенков канализационных очистных сооружений городов Украины [Текст] / А.И. Титов, А.С. Ютина, Е.Н. Андреев // Сборник докладов международного конгресса «ЕТЕВК - 97». –Ялта, 1997. –С.189-191.

20. Козловская С.Б. Комплекс сооружений по получению и утилизации биогаза на очистных сооружениях канализации [Текст] / С.Б. Козловская // Сборник докладов международного конгресса «ЕТЕВК - 99». –Ялта, 1999. – С.106-107.

21. Абрамович И.А. Производство и утилизация биогаза в Украине – современное состояние и перспективы [Текст] / И.А. Абрамович, И.Л. Бондарь, А.С. Ютина // Сборник докладов международного конгресса «ЕТЕВК –2001». –Ялта, 2001. –С.162-164.

22. Баадер В. Биогаз-Теория и практика [Текст] / В. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер // Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Фостера.– Л.:Химия,1990.–383 с.

23. Гелетуха Г.Г. Перспективы развития технологий получения биогаза в Украине [Текст] / Г.Г. Гелетуха, С.Г. Кобрзарь // Нефть и газ. –2001. –1/3 –88-91с.

24. Сунь Цзаньши. Сельские биогазогумусные установки в КНР [Текст] / Цзаньши Сунь //Техника в сельском. хоз-ве 1990. –№3. –17-23с.

25. Шрамков В.М. Переработка органических отходов в удобрение и биогаз [Текст] / В.М. Шрамков, В.Д. Савин // Техника и оборудование для села.–1999. –N1.–18-19с.