

Екологічно безпечний процес утилізації осадів стічних вод авіапідприємств із отриманням біогазу

© **С.Й. Шаманський**
канд. техн. наук
shamanskiy_s_i@ukr.net
С.В. Бойченко
д-р техн. наук
Національний
авіаційний університет

УДК 628.336.5

У статті проаналізовано останні дослідження процесів метанового бродіння та вплив різних факторів на їх інтенсивність. Систематизовано сучасні уявлення про анаеробне бродіння та запропоновано технологічні параметри цих процесів, які дають змогу суттєво їх інтенсифікувати у промислових масштабах. Сформульовано основні вимоги до конструкцій метантенків для застосування на очисних спорудах авіапідприємств.

Ключові слова: авіапідприємство, анаеробне бродіння, біогаз, метантенк, осад стічних вод.

В статье проанализированы последние исследования процессов метанового брожения и влияния различных факторов на их интенсивность. Систематизированы современные представления об анаэробном брожении и предложены технологические параметры этих процессов, которые позволяют существенно их интенсифицировать в промышленных масштабах. Сформулированы основные требования к конструкциям метантенков для использования на очистных сооружениях авиапредприятий.

Ключевые слова: авиапредприятие, анаэробное брожение, биогаз, метантенк, осадок сточных вод.

The paper dealt with analysis of the latest research of methane digestion processes and impacts of various factors on intensity thereof. Modern ideas on anaerobic digestion were systematised and some of the most appropriate parameters of these processes proposed, which enable significant intensification of the same on an industrial scale. Basic requirements were formed for the methane tank designs to be applied in wastewater treatment plants of aviation enterprises.

Key words: aviation enterprises, anaerobic digestion, biogas, methane tank, wastewater sludge.

Після механічного та біологічного очищення господарських стічних вод авіапідприємств утворюються осади різного виду. Вони містять 60–90 % органічних сполук, основними компонентами яких є білки, вуглеводи та ліпіди (жири) [1]. Утилізацію цих осадів можна проводити кількома методами [2]. Найпоширенішими з них є: спалювання; висушування та використання як будівельного матеріалу; як харчової добавки для тварин (активний мул); як добрива на сільськогосподарських полях.

Набуває поширення метод спалювання. Однак він має ряд недоліків. Безпосередньому спалюванню передують процес висушування. Для вологих осадів теплоти, що виділяється у процесі згоряння, може бути недостатньо для випаровування вологи. Досвід показує, що спалювати самостійно можна осади, в яких співвідношення вологи та органічної речовини не перевищує 3,5–4 до 1. В інших випадках необхідна додаткова витрата палива. Крім того, осади можуть містити солі важких металів. Під час спалювання вони потрапляють у продукти згоряння і, у разі відсутності очищення відхідних газів, викидаються у атмосферу. Очищення газоподібних продуктів згоряння від важ-

ких металів дорожче, ніж вартість їх видалення із осадів. Використання осаду як будівельного матеріалу також пов'язане зі значними затратами енергії на випаровування вологи. Очевидно, що ці методи можуть бути виправдані тільки у випадку неможливості чи недоцільності застосування інших методів утилізації.

Використання активного мулу як харчової добавки до раціону тварин пояснюється його високою поживною цінністю. Він містить багато білків та вітамінів, зокрема вітаміни групи В. Але питання утилізації осаду первинних відстійників, що містить багато неорганічних речовин, цим методом не вирішується.

Наявність в осадах таких речовин, як азот, фосфор, калій, мікроелементи тощо, робить їх цінною сировиною для органічних добрив. Таке використання потребує їх попереднього очищення від солей важких металів. Наявність значних кількостей органічних речовин провокує можливість швидкого загнивання. Інша небезпека полягає у значній бактеріальній, у тому числі патогенній, забрудненості.

Усунути ці недоліки можна шляхом стабілізації осадів анаеробним зброджуванням у метантенках із одночасним отриманням біогазу, який може бути ви-

користаний як для потреб самих очисних споруд, так і, за наявності надлишку, для реалізації іншим споживачам [3, 4]. Широке застосування такого методу стабілізації стримує значна тривалість процесів бродіння, пов'язана з недосконалістю використовуваних технологій. Наслідком цього є необхідність будівництва споруд великих розмірів, значних енергетичних затрат на температурну стабілізацію осадів. Часто це призводить до економічної неопукності їх функціонування.

Метою цієї роботи є модернізація існуючих технологій із урахуванням результатів останніх досліджень у галузі біохімії та мікробіології анаеробних процесів [5] та формування пропозицій щодо розробки нових конструкцій метантенків, які б дозволяли ефективно реалізовувати ці технології [6].

Об'єктом дослідження є фізичні, біохімічні та мікробіологічні процеси, що відбуваються протягом анаеробного бродіння.

Предметом дослідження є технології зброджування та конструктивні особливості метантенків.

Конструкції існуючих метантенків дають змогу класифікувати технологічні схеми анаеробної ферментації за такими основними ознаками: температурний режим бродіння; методи нагрівання субстрату; методи утримання мікроорганізмів, що здійснюють процес ферментації всередині реактора; неперервність процесу бродіння; розподілення процесу ферментації на ступені (зони бродіння) тощо [7].

Сучасні методи інтенсифікації цих процесів можна розділити на дві групи [8, 9]: мікробіологічні та конструктивно-технологічні. До мікробіологічних можна віднести: коферментацію (спільне зброджування відходів різного походження, які покращують характеристики бродіння); застосування нових штамів мікроорганізмів [5]; введення добавок, що стимулюють процеси окислення [10]; фіксацію мікроорганізмів на спеціальних носіях [11, 12]. За даними [13], у таких умовах можна зброджувати субстрати з більшими швидкостями.

До конструктивно-технологічних методів можна віднести [14]: застосування оптимальних температурних режимів; перемішування осадів під час бродіння; попередню підготовку субстратів; розподіл бродіння на стадії відповідно до сучасних уявлень про біохімію цих процесів [7].

У бродінні бере участь багато різних мікроорганізмів: деструктивні, що викликають гідроліз складної органічної речовини; бродильні, що утворюють органічні кислоти та нижчі спирти, аміак, водень; синтрофні, що перетворюють ці кислоти у оцтову кислоту, во-

день та окисли вуглецю; метанові, що безпосередньо виробляють метан. Процес можна розглядати як такий, що складається з чотирьох послідовних стадій (рисунок): гідроліз, кислотогенез, ацетогенез, метаногенез.

Якщо у трофічних ланцюгах аеробних процесів стосунки між групами організмів відбуваються переважно за принципом «хижак-жертва», то в процесах метанового бродіння трофічні ланцюги побудовані на використанні продуктів метаболізму одних груп бактерій іншими [14].

Мікроорганізми можна об'єднати у групи первинних анаеробів, що працюють на перших двох стадіях, та вторинних анаеробів – працюють на останніх двох стадіях. Продукти життєдіяльності перших є продуктами споживання для останніх. Швидкість проходження кожної стадії залежить від таких факторів, як температура, вміст кисню у реакторі, діапазон значень pH середовища, наявність токсичних та інгібуючих речовин тощо. На різних стадіях їх оптимальні значення є різними [14, 15]. Кислототворні та метанотворні мікроорганізми мають здатність пригнічувати діяльність одні одних. Одним із ключових параметрів є pH середовища. Для активної діяльності метаногенів pH потрібно знижувати, тоді як активна діяльність кислотогенів цей показник підвищує.

У сучасних технологіях процес здійснюється, як правило, в одній ємності (реакторі). У ній намагаються ство-

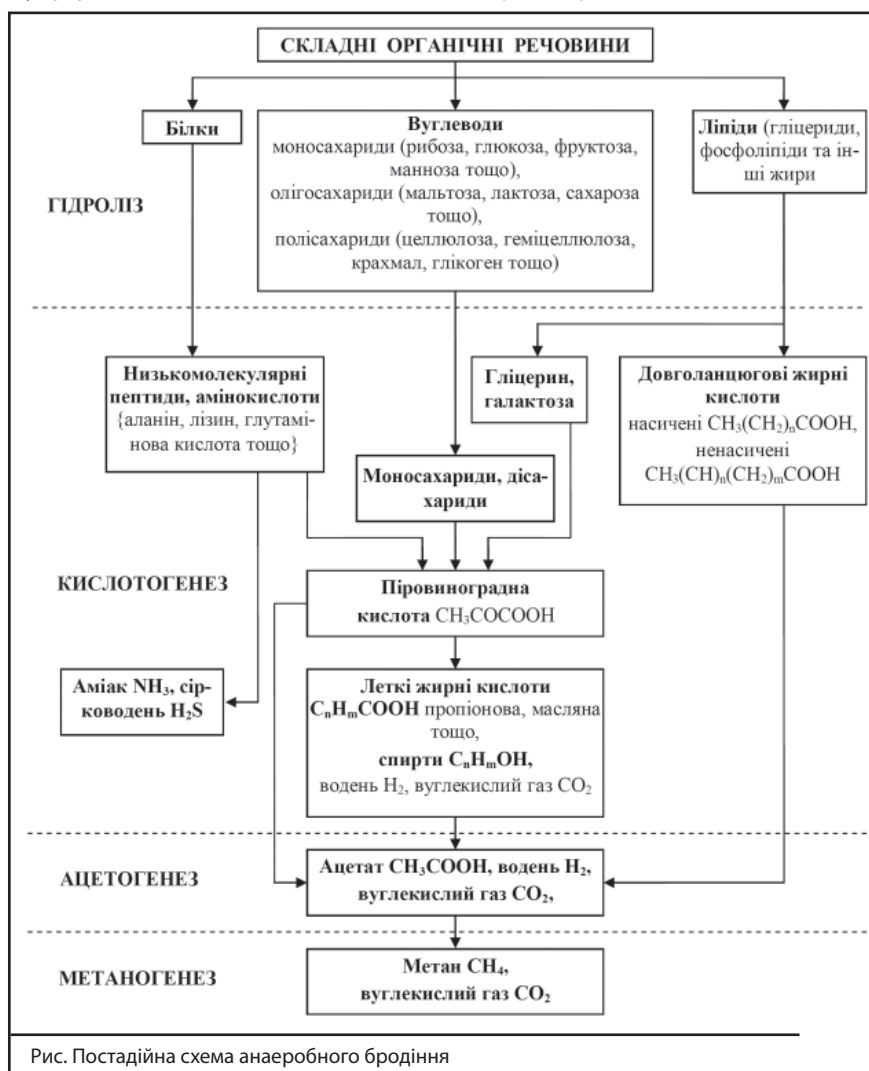


Рис. Постадійна схема анаеробного бродіння

рити оптимальні умови саме для метаногенів, які є більш чутливими до коливань параметрів середовища і ростуть повільніше. Це уповільнює діяльність кислотогенів. Для боротьби з цим у технологіях безперервного часткового завантаження-вивантаження часто підвищують дозу одноразового завантаження. У результаті цього активізуються первинні анаероби, концентрація кислот у реакторі росте, pH середовища знижується, надмірна кількість кислот не переробляється метаногенами, які є дуже чутливими до зниження pH , і процес метаногенезу сповільнюється. Дослідженнями встановлено, що під час розділення кислотогенних та метаногенних бактерій активність обох груп суттєво зростає [14].

Гіпотезою роботи є припущення, що для інтенсифікації бродіння доцільним є здійснення чотирьох різних стадій в окремих ємностях і створення в них оптимальних умов для кожної стадії [6]. У першій ємності (гідролізаторі) можна досягати швидкого і глибокого гідролізу органіки, у другій – швидкого кислотогенезу без перетворення кислот у метан та з виділенням лише CO_2 . У третій та четвертій – швидкого та ефективного перетворення кислот на метан, запобігаючи їх новому утворенню (що інгібує метаногенез).

Науково-прикладна задача, що вирішується в роботі, – зробити процеси анаеробної стабілізації економічно окупними шляхом розробки нових технологій та конструкцій метантенків.

На стадії гідролізу працюють переважно такі види бактерій: целлюлозолітичні та цукролітичні (*Clostridium Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Ruminococcus*, *Acetivibrio*, *Lactobacillus* тощо); протеолітичні (*Clostridium Peptococcus*, *Bifidobacterium*, *Staphylococcus* тощо); ліполітичні (*Clostridium Micrococcus*, *Ruminococcus*, *Butyrivibrio* тощо). Стадія не є надто чутливою до параметрів середовища. Оптимальними умовами для неї є такі, за яких ефективно руйнуються органічні сполуки. Для руйнування можна використовувати попередню або паралельну обробку осадів [16] такими методами, як механічне подрібнення, обробка кислотою (кислотний гідроліз); обробка лугом (лужний гідроліз); нагрівання до високих температур 100–180 °С (температурний гідроліз); опромінювання ультразвуком (УЗ-гідроліз). Дослідження свідчать, що найкращих результатів можна досягати, застосовуючи температурний гідроліз, лужний гідроліз та їх комбінацію, а також УЗ-гідроліз. Термічний гідроліз пов'язаний зі значними затратами енергії на нагрівання, а потім охолодження для подальшого бродіння. Під час проходження ультразвукових хвиль у середовищі виникає кавітація, яка руйнує органіку. Для формування технологічних процесів можна запропонувати поєднання лужного гідролізу з обробкою ультразвуком. Інтенсивність руйнування органіки напряму залежить від інтенсивності викликаної кавітації. Для її підвищення без збільшення дози опромінювання ультразвуком можна запропонувати одночасне барботування осаду газом. Газові бульбашки, проходячи через середовище, стають центрами зародження кавітації, що знижує затрати енергії на її утворення. Дослідження показують [17], що з додаванням барботування до УЗ-опромінювання під час знезаражування забруднених вод константа швидкості руйнування органіки зростає у 2,6 раза, біологічної складової – у 4,3 раза.

Процес доцільно проводити при надлишковому тиску $0,5 \cdot 10^5$ Па. Ті ж досліди показують, що це сприяє зростання константи по органічних сполуках у 1,2 раза, а по біологічній складовій – у 1,5 раза. Надлишковий тиск підвищує енергію захоплення кавітаційних бульбашок, проте подальше його збільшення утруднює виникнення самої кавітації.

Для барботажу не варто використовувати повітря, оскільки це порушує анаеробне середовище в реакторі. Можна запропонувати натомість біогаз, отриманий на подальших стадіях бродіння, або CO_2 , якщо технологія передбачає його відокремлення від біогазу і збирання у ємності. На цій стадії температурна стабілізація не грає помітної ролі, тому осад можна поступово нагрівати до температури, необхідної на наступній стадії.

Для збільшення швидкості та глибини гідролізу доцільно рециркулювати частину осаду з метанової фази. Час перебування осадів у гідролізаторі залежить від інтенсивності обробки і може не перевищувати 30 хв [16]. Перед подачею у наступну ємність до осадів потрібно додавати кислоту (наприклад, HCl) для відновлення pH середовища до значень 6,5–7,6.

На стадії кислотогенезу працюють переважно такі види бактерій: кислотогенні гідролітичні (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Micrococcus*, *Ruminococcus*, *Acetivibrio*, *Lactobacillus Peptococcus*, *Bifidobacterium Staphylococcus* тощо); сульфатредуючі (*Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* тощо); денітрифікуючі (*Lactobacillus*, *Streptococcus* тощо). На цій стадії відбувається ферментація мономерів, що утворилися під час гідролізу, до жирних кислот довгого ланцюга (ЖКДЛ), амінокислот, спиртів, піровиноградної кислоти (пірувату $CH_3COCOOH$). У глибокогідролізованих осадах кислотоутворення відбувається швидко. Головним побічним продуктом є CO_2 . Виділяється також невелика частина H_2 .

Після утворення амінокислот відбувається відокремлення аміногрупи NH_2 (дезамінування) з утворенням вільного аміаку NH_3 . У разі наявності в осадах мінеральної сірки її частково чи повністю окислені з'єднання піддаються сульфатредукції шляхом окислення органічної речовини чи водню. У результаті виділяється сірководень H_2S . Під час бродіння в одній ємності ці процеси призводять до наявності у вихідному біогазі залишкових концентрацій аміаку та сірководню, а також значної кількості CO_2 , що погіршує його якість. Крім того, наявність аміаку та сірководню на подальших стадіях пригнічує діяльність метаногенних бактерій [13].

Якщо парціальний тиск водню збільшується, що може бути викликано недостатнім його споживанням синтрофними мікроорганізмами, запускаються метаболічні механізми синтезу кислотогенними бактеріями етанолу (CH_3CH_2OH), пропіонової кислоти (CH_3CH_2COOH) та її солей (пропіонатів), масляної (бутанової) кислоти ($CH_3CH_2CH_2COOH$) та її солей (бутіратів), а також інших легких жирних кислот (ЛЖК). У результаті їх накопичення pH осадів суттєво знижується і, за даними [14], може досягати 5,2–5,5. У реакторах без розподілення на стадії це призводить до дестабілізації процесу, оскільки низьке значення pH середовища пригнічує активність решти мікрофлори, зокрема метаногенів. У результаті суттєво сповільнюються подальші процеси метаногенезу.

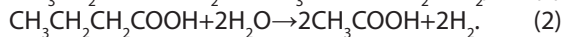
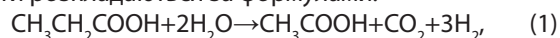
незу. Якщо парціальний тиск водню знижується, утворення кислот сповільнюється і запускаються метаболічні механізми ацетогенної стадії. При цьому кількість кислот, що могла б утворитися на цій стадії і стати джерелом утворення метану, знижується.

Під час здійснення кислотогенезу в окремії ємності доцільно організувати незалежне відведення газоподібних продуктів цієї стадії з реактора. Стадію доцільно проводити при атмосферному тиску, рН при цьому має бути від 6,5 до 5,0. За таких умов CO₂ легко переходить у вільну форму і виділяється у вигляді газу. Метан при цьому майже не виділяється. Його співвідношення з CO₂ становить 1 до 25–50. Доцільно вводити в реактор додаткову кількість водню для підвищення його парціального тиску і тим самим стимулювання кислотоутворення. Доречно проводити барботування воднем, що одночасно забезпечить перемішування осаду й усуне необхідність застосування спеціальних систем для перемішування.

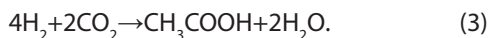
Газоподібні продукти цієї стадії міститимуть переважно CO₂ із домішками NH₃, CH₄, невеликою кількістю H₂ та можливою наявністю H₂S.

Бактерії, що забезпечують процес, є невибагливими і швидкозростаючими, тому, за припущенням [16], кислотогенна стадія не може тривати понад 10 год, оскільки після цього не має відбуватися подальшого накопичення кислот. Індикатором завершення кислотогенної стадії може бути зупинка зниження рН середовища.

На стадії ацетогенезу працюють два типи мікроорганізмів. Перший утворює оцтову кислоту з продуктів кислотоутворення. Тут працюють ацетогенні бактерії та β-окислювачі, що переважно розкладають жирні кислоти довгого ланцюга та леткі жирні кислоти (ЛЖК) – *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Clostridium* тощо. У результаті їх життєдіяльності виділяється водень. ЖКДЛ, ЛЖК, амінокислоти і спирти перетворюються у ацетат (оцтову кислоту). При цьому пропіонова та масляна кислоти розкладаються за формулами:



Другий тип також утворює оцтову кислоту, але шляхом використання водню та CO₂. При цьому працюють сульфатредукуючі бактерії – *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* тощо. Процес проходить за формулою



Незважаючи на те, що водень є необхідним для функціонування другого типу бактерій, занадто висока його концентрація в реакторі інгібує діяльність першого типу. За даними [16], критичним значенням парціального тиску водню є $p\text{H}_2 = 10$ Па. При цьому, за даними [13], навіть незначне його підвищення може спричинити повне припинення функціонування другого типу бактерій, які виробляють водень. Тому можна зробити висновок, що на ацетогенній стадії надзвичайно важливим є стеження в режимі реального часу за концентрацією H₂ у реакторі.

Для метантенків, де процеси бродіння відбуваються в одній ємності, рекомендують підтримувати окислювально-відновний потенціал середовища на рівні $E_h = 330$ мВ. З його зниженням активізується утворення

водню та сульфідів, що може призводити до збільшення у вихідному біогазі концентрації сірководню.

Під час здійснення стадії ацетогенезу в окремії ємності процес доцільно проводити при атмосферному тиску або при невеликому надлишковому (можна прийняти 0,5–10⁵ Па). Для перемішування рекомендується проводити слабкий барботаж осаду за допомогою CO₂ із постійним видаленням його надлишку з реактора. Інтенсивне перемішування не рекомендовано, оскільки ацетогенні бактерії краще розмножуються у тісному контакті між собою. У разі порушення цих контактів розмноження сповільнюється. У процесі барботажу CO₂ сприятиме функціонуванню третього типу мікроорганізмів. Невеликий надлишковий тиск покращить переведення CO₂ у зв'язаний стан і його засвоєння мікроорганізмами. Це своєю чергою покращить споживання ними водню. Разом із видаленням газоподібних продуктів із реактора видалятиметься також газоподібний водень, що сприятиме зниженню його парціального тиску. На цій стадії необхідно також стежити за підтримкою окислювально-відновного потенціалу середовища.

На стадії метаногенезу також працюють два типи бактерій. Перший утворює метан шляхом розщеплення оцтової кислоти. При цьому працюють такі бактерії, як *Methanosaeta*, *Methanosarcina* тощо. Цей тип утворює близько 72 % усього метану у біогазі. Процес відбувається за формулою:



Другий утворює решту (28 %) метану шляхом відновлення вуглекислого газу воднем. Тут працюють бактерії *Methanobacterium*, *Methano-brevibacter*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium*, *Methanosarcina* тощо. Це відбувається за формулою:



Дослідження показують, що після відділення від кислотогенів метаногени демонструють у кілька разів більшу швидкість зростання, ніж під час сумісного культивування [18]. Також суттєво збільшується швидкість конверсії оцтової кислоти у метан. Вона навіть починає перевищувати швидкість її утворення. Тривалість ацетогенної та метаногенної стадій за таких умов, за даними [14], може бути меншою від трьох діб.

Ще однією характерною особливістю метанових бактерій (як і ацетогенних) можна назвати здатність активно розмножуватися у тісному симбіозі з іншими групами мікроорганізмів, які забезпечують їх необхідними поживними речовинами. При цьому, окрім трофічних зв'язків між групами, важливими є також фізичні зв'язки. У разі сильних динамічних навантажень, наприклад занадто інтенсивного турбулентного перемішування, тісні контакти між мікроорганізмами та їхніми групами порушуються і процес розмноження сповільнюється. Таким чином, на стадії метаногенезу осади потребують помірного перемішування, яке має лише забезпечувати їх гомогенізацію, запобігати осіданню твердих частинок та утворенню коринки. Пропелерні мішалки, які часто застосовуються, не можуть вважатися задовільними.

Метаногенні бактерії потребують жорсткого анаеробного середовища. Концентрація кисню в реакторі

на рівні 0,01 мг/л призводить до їх загибелі. Отже, однією з першочергових вимог має бути герметичність реактора протягом усього процесу та контроль за вмістом кисню у осадах. Метанові бактерії дуже чутливі до коливань температури. Допустимі відхилення від її оптимального значення: для мезофільних бактерій ± 2 °C; для термофільних $\pm 0,2$ °C. Тому підігрівання субстрату шляхом подавання пари всередину реактора, що широко використовується у сучасних технологіях зброджування осадів, не можна вважати задовільним. Локальні підвищення температури призводять до загибелі бактерій. Для ефективного функціонування метаногенів необхідним є наявність у осадах таких мікроелементів, як калій, натрій, кальцій, магній, кобальт, мідь, бор, цинк, молібден. Проте у великих кількостях вони є токсичними.

У традиційних технологіях отримання біогазу відсоток CO₂ у кінцевому продукті сягає близько 38 %. У [9] зроблено припущення, що причиною високого відсотку залишкового CO₂ є недостатня кількість в реакторі водню для дії другого типу метаногенних бактерій. Тому доцільним є використання саме водню для слабкого барботажу осадів із метою їх перемішування.

Оптимальне значення рН середовища для метаногенів становить 7,5–8,0. Якщо при цьому процес проводиться з надлишковим тиском 0,5 МПа, то за даними [19], CO₂, який виділяється першим типом метаногенів, із вільної форми переходить у зв'язану і практично не виділяється з субстрату. Метан при цьому має слабку

розчинність, незалежно від тиску, і виділяється добре.

Дослідження показують, що на розмноження метанових бактерій позитивний вплив здійснюють біологічно активні добавки. Зокрема, пришвидшує їх розмноження мелафен (меламінова сіль біс(оксиметил)-фосфінової кислоти [10]). В роботі [11] експериментально показано, що додавання біостимуляторів типу BIOSTIM-SBCH₄ підвищує швидкість зброджування органічних субстратів у 3–4 рази. Разом із тим це призводить до збільшення концентрації метану у біогазі.

Отже, метаногенез доцільно проводити в окремій ємності з рН середовища 7,5–8,0 і надлишковим тиском 0,5 МПа. Протягом процесу необхідно проводити слабе барботування осадів за допомогою H₂, перед початком метаногенезу у осад потрібно додати біологічно активні добавки (BIOSTIM-SBCH₄), а також невелику кількість мікроелементів (калій, натрій, кальцій, магній, кобальт, мідь, бор, цинк, молібден). Дози біодобавок та мікроелементів доцільно визначати експериментально для кожного осаду пробним зброджуванням.

Висновок

У результаті застосування запропонованих рекомендацій можна очікувати, що процес анаеробного зброджування триватиме до 3 діб. Газова фаза продуктів бродіння на стадії метаногенезу буде містити більше 90–95 % метану (за традиційних технологій отримання біогазу вміст метану у ньому становить до 60 %, а тривалість бродіння – понад 15 діб).

Список використаних джерел

1. **Яковлев С.В.** Канализация / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.
2. **Удалов Р.В.** Экологические аспекты обработки и утилизации осадков сточных вод / Р.В. Удалов, Л.В. Андреева // Ученые записки Института СХПР НовГУ. – 2006. – Т. 14. – С. 45–59.
3. **Бабаев В.Н.** Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов / В.Н. Бабаев, Н.П. Горох, И.В. Коринько / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6. Т. 4. – С. 59–65.
4. **Фесюк В.О.** Оцінка перспектив добування біогазу з осадів стічних вод Луцьких міських комунальних очисних споруд / В.О. Фесюк // Природа Західного Полісся та прилеглих територій. – 2010. – № 7. – С. 84–90.
5. **Волова Т.Г.** Биотехнология / Т.Г. Волова. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 1999. – 252 с.
6. **Лісіцин Є.Ф.** Знезаражування осаду каналізаційних стоків з отриманням біогазу у багатосекційних метантенках / Є.Ф. Лісіцин, С.Й. Шаманський, В.В. Почтовенко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4. – С. 107–110.
7. **Трахунова И.А.** Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2014. – 19 с.
8. **Караева Ю.В.** Обзор биогазовых технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания / Ю.В. Караева, И.А. Трахунова // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 109–127.
9. **Ковалев В.В.** Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии / В.В. Ковалев, Д.В. Унгуриян, О.В. Ковалева // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 1. – С. 102–114.
10. **Барский Е.Л.** Эффект мелафена на развитие культур цианобактерий и зеленых микроводорослей в стрессовых условиях / Е.Л. Барский, И.О. Шандиева, Я.В. Саванина [и др.] // Вестник Московского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 15–20.
11. **Liao B.Q.** Anaerobic membrane bioreactors / B.Q. Liao, J.T. Kraemer, D.M. Bagley // Application and research directions. Sci. Technol. – 2006. – № 36. – P. 489–530.
12. **Ungureanu D.** Biological wastewater treatment using fixed film / "Innovations in the field of water supply, sanitation and water". Paper of Conference of the young scientists and researches, Bucharest, 15–17 June 2005. – Pp. 97–102.
13. **Корзникова М.В.** Стратегические аспекты устойчивого управления отходами животноводства и птицеводства в целях минимизации негативного воздействия на окружающую среду: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Москва, 2006. – 38 с.
14. **Гюнтер Л.И.** Метантенки / Л.И. Гюнтер, Л.Л. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991. – 280 с.
15. **Möller U.** Entseuchung von Klarschlamm. Eine Standardbestimmung 1987 / U. Möller // Korrespondenz Fbwasser, 1988. – № 1. – P. 24–30.
16. **Данилович Д.А.** Влияние предварительной обработки осадков сточных вод на полноту протекания процесса метанового сбраживания / Д.А. Данилович, М.Н. Козлов, М. В. Кевбрина, Д.В. Гусев / Вода: технологии, материалы, оборудование, экология. – 2009. – № 2. – С. 24–26.
17. **Предзимирська Л.М.** Кавітаційне очищення природних і стічних вод від органічних та біологічних забруднень: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Івано-Франківськ, 2015. – 21 с.
18. **Welsh F.** Untersuchungen zur Optimierung der zweistufigen anaeroben Klarschlamm // GFW-Wasser-Abwasser, 1986. – № 3. – P. 109–117.
19. **Patent US4722741 A, USA.** Production of high methane content product by two phase anaerobic digestion [Text] / Thomas D. Hayes, H. Ronald Isaacson, James R. Frank; Assignee: Gas Research Institute, 8600 West Bryn Mawr Avenue, Chicago, IL, USA. – Appl. No.: US 06/710,328; Filed: March 11, 1985; Published: February 2, 1988.