Запропоновано нову екологічно безпечну технологію стабілізації осадів побутових стоків авіапідприємств шляхом анаеробного зброджування. Технологія дозволяє інтенсифікувати бродіння суттєво скоротивши його загальні терміни та зробити процес економічно окупним. Технологія дозволяє отримувати товарний вуглекислий газ, екологічно безпечне органічне добриво для сільського господарства та біогаз з суттєво більшою концентрацією метану порівняно з існуючими технологіями

Ключові слова: авіапідприємство, біогаз, інтенсифікація, метантенк, осад стічних вод, технологія анаеробного бродіння

Предложена новая экологически безопасная технология стабилизации осадков бытовых стоков авиапредприятий путем анаэробного сбраживания. Технология позволяет интенсифицировать брожение, существенно сократить его общую продолжительность и сделать процесс экономически окупаемым. Технология позволяет получать товарный углекислый газ, экологически безопасные органические удобрения для сельского хозяйства и биогаз с существенно большей концентрацией метана по сравнению с существующими технологиями

Ключевые слова: авиапредприятие, биогаз, интенсификация, метантенк, осадок сточных вод, технология анаэробного брожения

УДК 628.336.5
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.52264

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНА ТЕХНОЛОГІЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД АВІАПІДПРИЄМСТВ

С. Й. Шаманський
Кандидат технічних наук*
E-mail: shamanskiy_s_i@mail.ru
С. В. Бойченко
Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*
E-mail: chemmotology@ukr.net
*Кафедра екології
Національний авіаційний університет
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

На очисних спорудах господарчо-побутових стічних вод авіапідприємств утворюються значна кількість різних осадів. Це відходи, що затримуються решітками (незначна кількість), сирий осад первинних відстійників, активний мул, чи біоплівка, що утворюється в спорудах аеробного біологічного очищення стічної води та видаляється з вторинних відстійників.

Загальний об'єм осадів складає близько 1 % від об'єму стічної води, що очищується. Їх склад може змінювати, але в цілому вони містять беззольну частину (органічні сполуки) – від 60 до 90 % та зольну частину (неорганічні сполуки) – від 10 до 40 %. Беззольна частина складається переважно з білків, вуглеводів та жирів – разом від 80 до 85 %. Їх співвідношення можуть суттєво відрізнятися. Решта 15...20 % це лігнинно-гумусові з'єднання [1]. Пошук ефективних методів утилізації цих осадів є актуальним та невідкладним завданням.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Існує багато методів утилізації осадів [2, 3] такі, як: спалювання в спеціальних печах; висушування, спеціальна обробка та використання в якості будівельного матеріалу; додавання як харчової добавки до раціону деяких видів тварин; удобрювання сільськогосподарських полів.

Метод спалювання стає зараз поширеним. Спалюють переважно в багатоподових чи барабанних печах та в печах з кип'ячим шаром. Зокрема на Бортницькій станції аерації проводиться будівництво лінії зі спалювання осаду стічних вод м. Києва. При спалюванні відбувається окислення органічних речовин в осаді і утворюється зола, яка може бути використана для різних цілей, наприклад як присадка до нових порцій осадів перед їх зневодненням. Це дозволяє знижувати витрату інших реагентів.

Проте метод спалювання має недоліки. Зокрема економічний фактор. Він суттєво залежить від вмісту та складу беззольної речовини та вологості осаду. Нижча теплота згоряння осадів побутових стічних вод коливається в межах 16,8...27,4 МДж/кг беззольної речовини. Вологість ущільнених осадів коливається у межах 96...98 % Питома витрата енергії на випаровування складає 4,2 МДж/кг води. Тобто для випаровування вологи може бути потрібно більше теплоти, ніж її виділяється при згорянні беззольної частини. За таких умов для спалювання потрібна додаткова витрата палива. Тобто процес є економічно неокупним.

Для використання осадів у будівництві також потрібна енергозатратна попередня обробка, зокрема висушування.

Як харчову добавку для тварин можна використовувати лише активний мул, в якому є багато білків та вітамінів, серед яких особливо багато вітаміну B_{12}.

Одним з найбільш економічно вигідних може бути використання як активного мулу, так і осадів первин-

© С. Й. Шаманський, С. В. Бойченко, 2015

них відстійників для удобрювання сільськогосподарських полів. Ці осади містять значну кількість цінних елементів: калій, фосфор, азот тощо. Разом з тим вони можуть містити значну кількість патогенних мікроорганізмів, а також солі важких металів. Крім того сирі осади схильні до загнивання.

Наявність великої кількості органічних сполук робить ефективним анаеробне зброджування осадів в метантенках. Таке зброджування усуває небезпеку подальшого загнивання, а за умови здійснення процесу в термофільних умовах, знищує більше 98 % патогенних мікроорганізмів. Біогаз, що при цьому отримується, дозволяє частково забезпечувати власні потреби очисних споруд в енергоносіях, а іноді і поставляти його на ринок [4, 5]. Зброджування не знижує вміст солей важких металів в осадах. Більше того, через токсичність для анаеробної мікрофлори ці солі сповільнюють бродильні процеси [6]. Таким чином перед зброджуванням необхідно проводити попереднє очищення осадів від цих солей. Потрібно сказати, що солі важких металів несуть у собі небезпеку майже при усіх методах утилізації осадів (при спалюванні разом з продуктами згоряння важкі метали надходять у атмосферу, при використанні як харчової добавки – опиняються у організмах тварин тощо). Тому таке очищення є потрібним майже завжди.

Головним недоліком методу анаеробного зброджування є те, що існуючі технології бродіння, а, відповідно і конструкції метантенків, є недосконалими. Процеси бродіння займають досить тривалий час, метантенки конструюються великої ємності з тривалим часом перебуванні осадів у них, а вихід біогазу при цьому є незначним. В реальних умовах спалювання отримуваного біогазу часто не покриває енергозатрат на температурну стабілізацію осадів протягом бродіння.

Актуальним завданням є розробка нових технологій зброджування, які ґрунтуються на результатах останніх наукових досліджень біохімічних та мікробіологічних процесів, що відбуваються під час анаеробного бродіння [7, 8].

Існує велика різноманітність конструкцій метантенків, які класифікують за різними ознаками [9]. Існує також значна кількість методів інтенсифікації бродильних процесів у метантенках які об'єднують у дві групи: мікробіологічні та конструктивно-технологічні [10, 11].

Мікробіологічні методи інтенсифікації включають:

– метод сумісного зброджування різних відходів. Підбираються такі комбінації відходів, які покращують характеристики бродіння. При цьому відходи, що додаються не повинні погіршувати якості стабілізованого осаду як добрива);

– використання стимулюючих добавок (у приготовлений для бродіння субстрат додаються органічні каталізатори, наприклад «мелафен», які змінюють співвідношення вуглецю та азоту у субстраті, наближуючи його до оптимального) [12];

– селекція нових культур анаеробних мікроорганізмів (японська фірма «Matsushita Electric Industrial Co» вивела нову культуру метаногенних бактерій Methanobacterium kadomensis St.23, яка за даними [7] здатна значно скорочувати тривалість бродіння);

– іммобілізація анаеробних мікроорганізмів всередині метантенка (застосовується адгезійне та абсорбційне закріплення біомаси на поверхні інертних матеріалів [13, 14]. При цьому як матеріал для закріплення можна використовувати галечник, керамзит, скловолокно тощо [15].

Конструктивно-технологічні методи інтенсифікації включають [16]:

– пошук оптимальних режимів перемішування (швидше вивільнюється продукований біогаз, попереджується утворення коринки та випадіння деяких речовин у осад, вирівнюється температура та забезпечується рівномірний розподіл популяцій бактерій по об'єму реактора, попереджується утворення пустот та скупчень, які зменшують ефективний об'єм реактора);

– використання ультразвукових та гідродинамічних кавітаційних деструкторів, кислот, лугів, нагрівання до високих температур тощо, які пришвидшують процеси гідролізу органіки);

– здійснення бродіння постадійно з врахуванням особливостей мікробіології та біохімії кожної стадії (деякі автори зазначають, що це складно реалізувати технічно, оскільки для цього потрібно значне ускладнення конструкції метантенка, або застосування додаткових складних апаратів [9]).

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є аналіз методів інтенсифікації анаеробного бродіння і розробка енергоефективної та екологічно безпечної технології зброджування осадів побутових стічних вод авіапідприємств.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

– дослідити процеси, що відбуваються на різних стадіях анаеробного бродіння;

– визначити оптимальні параметри середовища на кожній стадії та запропонувати методи інтенсифікації кожної стадії;

– розробити технологічну схему зброджування осадів.

4. Методи дослідження стадій анаеробного бродіння

Під час дослідження використано системний підхід до аналізу методів інтенсифікації та формування технологічних вимог до процесів бродіння. Використано дедуктивні методи дослідження чотирьох різних стадій анаеробного бродіння та оптимальних параметрів для їх проходження. Також використано індуктивні методи формування нового технологічного процесу та його складових.

5. Результати дослідження стадій анаеробного бродіння

При метановому бродінні органічні сполуки розкладаються в анаеробних умовах до кінцевих продуктів, основними з яких є метан та вуглекислий газ. За сприятливих умов у ці гази може перетворюватися до 95 % органіки, яка розклалася. Останні дослідження, що пояснюють особливості впливу різних факторів на бродіння, дозволяють застосовувати нові підходи до

організації цих процесів з метою їх інтенсифікації у промислових масштабах і створювати нові технології та конструкції реакторів.

Кількісний та якісний склад анаеробної мікрофлори, а також активність та швидкість розмноження мікроорганізмів значною мірою залежить від складу осадів та умов, що створюються у метантенку. Але в цілому, метаболічні процеси, що відбуваються протягом бродіння, підпорядковуються одним правилам. На відміну від більшості аеробних процесів, де мікроорганізми співіснують за принципом хижак-жертва, в анаеробних процесах продукти життєдіяльності одних мікроорганізмів стають поживними елементами для інших [16]. В результаті бродіння можна розглядати як незалежні, практично послідовні метаболічні процеси різних груп бактерій [17]. Серед них виділяють чотири основних групи. Перша група (гідролітична) – мікроорганізми, що викликають гідроліз складних органічних речовин до більш простих, розчинних у воді і тому доступних для подальшого бродіння. При цьому білки гідролізують у розчинні пептони, вуглеводні гідролізують спочатку до полісахаридів, потім до олігосахаридів і потім до моносахаридів. Жири гідролізуються до гліцеридів, фосфоліпідів тощо. Друга група (кислотогенна) – мікроорганізми, які, використовуючи продукти гідролізу, утворюють спочатку низькомолекулярні пептиди та амінокислоти, потім леткі жирні кислоти та спирти, а також довголанцюгові жирні кислоти. Третя група (ацетогенна) – мікроорганізми, котрі використовують кислоти та спирти для утворення перш за все ацетату (оцтової кислоти). Четверта група (метаногенна) – мікроорганізми, що виробляють метан з продуктів життєдіяльності ацетогенних бактерій.

Активність цих груп мікроорганізмів залежать від параметрів середовища. Серед них pH середовища, його температура, концентрація кисню, наявність, чи відсутність інших речовин. Для різних груп бактерій оптимальні значення цих параметрів, як правило, різні [18, 19].

Існуючі технології передбачають переважно таку організацію процесу: одноступеневе зброджування (усі процеси відбуваються у одній ємності); двоступеневе зброджування (перша ємність призначена для інтенсивного бродіння та інтенсивного газовиділення, друга для згасання процесу і розшарування осаду на стабілізований субстрат та мулову воду); багатоступінчасте зброджування (додаються додаткові ємності, в яких переважно відбувається повніше ущільнення зброджeного осаду). Дво- та багатоступеневі технології мають ту перевагу, що дозволяють зменшити об'єми зброджeного осаду за рахунок кращого відведення мулової води і тим самим зменшити об'єми споруд для подальшого зневоднення осадів. Але такі технології збільшують об'єми і ускладнюють конструкції самих метантенків суттєво не покращуючи при параметрів самого процесу бродіння. Основна частина процесу все одно відбувається в ємності першого ступеня, в якій намагаються створити сприятливі умови для більш вибагливих та повільно ростучих мікроорганізмів, якими є метанові бактерії. Ці умови пригнічують діяльність кислототворних бактерій, оскільки сприятливі умови для них є різними. Результатом є те, що кислотоутворення сповільнюється, кількість продуктів життєдіяльності кислотогенів зменшується. Ці продукти є джерелом живлення для ацетогенних, а далі для метаногенних бактерій тому кінцевий вихід біогазу зменшується. Якщо створюються умови, більш сприятливі для кислотоутворюючих мікроорганізмів, кількість кислот у метантенку збільшується, суттєво знижується pH середовища, що інгібує діяльність метаноутворюючих бактерій. Тому у метантенку, як правило, намагаються створити гібридні умови, досягнувши певної рівноваги між активністю кислототворних та метанотворних бактерій. Очевидно, що такий підхід не має багато резервів подальшого розвитку. Разом з тим проведені дослідження свідчать, що швидкість росту кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій, що беруть участь у процесах бродіння суттєво збільшується, якщо їх відділити у просторі [16]. На підставі виконаних досліджень можна також робити висновки про оптимальні параметри середовища, необхідні для активного росту та діяльності не тільки кислотоутворюючих і метаноутворюючих, але і інших груп бактерій, що здійснюють різні метаболічні процеси протягом бродіння [20–24].

У цій роботі пропонується екологічно безпечна та енергоефективна технологія анаеробного зброджування осадів з розподілом усього процесу на чотири послідовні стадії: гідролізу, ацетогенезу, кислотогенезу, метаногенезу та проведенням кожної стадії в окремій ізольованій ємності, а також створенням у кожній ємності оптимальних параметрів середовища для працюючих на цій стадії груп бактерій.

Результати досліджень показують, що оптимальними умовами для стадії гідролізу є умови, при яких органічні сполуки швидко руйнуються. Для підвищення інтенсивності цього процесу можна застосовувати такі відомі методи, як [20]: механічне подрібнення осадів, додавання до них кислоти, додавання лугу, нагрівання до високих температур, опромінення ультразвуком.

Осади, що видаляються з відстійників містять досить дрібні частинки і, можна очікувати, що механічне подрібнення, при досить великих енергозатратах, не дасть помітного ефекту.

Додавання лугу дещо краще руйнує органіку, ніж додавання кислоти. Нагрівання до високих температур дає хороші результати, але також вимагає значних енергетичних затрат.

За даними [20] опромінення ультразвуком має кращий ефект ніж усі попередні. Під дією ультразвуку в осадах виникає ультразвукова кавітація, яка спричиняє механічне руйнування органіки. При цьому інтенсивність руйнування визначається інтенсивністю кавітації, яка, у свою чергу, визначається інтенсивністю опромінення. Збільшення інтенсивності опромінення пов'язано зі збільшенням енергетичних затрат. Додавання барботування рідкого середовища газом [21] при одночасному опроміненні дозволяє збільшити інтенсивність кавітаційних явищ. Це пояснюється тим, що введені у середовище газові бульбашки стають центрами зародження кавітації, інтенсифікуючи її зі значно меншими додатковими затратами енергії. При цьому за даними [21] константа швидкості руйнування органічної складової збільшується до 2,6 разів, біологічної складової – до 4,3 разів.

Підвищення тиску в середовищі з одного боку інтенсифікує захлопування кавітаційних бульбашок, тим самим збільшує локальне підвищення тиску і

сприяє інтенсифікації гідролізу, а з іншого боку підвищує кавітаційний поріг, утруднюючи саму появу кавітаційних бульбашок. За даними [21] оптимальним значенням надлишкового тиску, при якому спостерігається максимальне значення константи швидкості руйнування органіки складає $0{,}5 \cdot 10^5$ Па. У порівнянні з веденням процесу при атмосферному тиску константа по органічній складовій збільшується до 1,2 рази, а по біологічній складовій у 1,5 рази.

Барботаж варто проводити інертним газом, який не містить кисню, щоб не порушувати анаеробне середовище у метантенку. Доцільно використовувати для цього вуглекислий газ, який отримується протягом подальшого бродіння.

Кислотогенні бактерії є швидкоростучими і невибагливими анаеробами, тому, якщо осади глибоко гідролізовані, то стадія кислотогенезу проходить швидко [22]. Головними кінцевими продуктами цієї стадії є довголанцюгові жирні кислоти (ненасичені $CH_3(CH_n)(CH_2)_mCOOH$ та насичені $CH_3(CH_2)_nCOOH$), леткі жирні кислоти C_nH_mCOOH (пропіонова, масляна тощо), спирти C_nH_mOH.

На цій стадії як побічний продукт виділяється CO_2 та невелика кількість H_2. Відбувається також дезамінування амінокислот, що утворилися. В результаті з вивільненої аміногрупи NH_2 утворюється аміак NH_3, що виділяється у вигляді газу. Якщо в осадах міститься сірка, то в наслідок сульфатредукції її з'єднань утворюється сірководень H_2S.

Важливе значення на цій стадії має парціальний тиск водню, оскільки він в значній мірі визначає склад кінцевих продуктів цієї стадії. При його збільшенні кислотогенні бактерії активізуються, виробляючи етанол CH_3CH_2OH, пропіонову кислоту CH_3CH_2COOH, масляну кислоту $CH_3CH_2CH_2COOH$ та їх солі, а також інші леткі жирні кислоти. Через їх накопичення pH середовища знижується і може досягати 5,2...5,0 [16]. При цьому якщо кислотогенну стадію здійснювати при атмосферному тиску то CO_2 легко вивільняється і переходить у газоподібну форму. За таких умов метан в ємності практично не утворюється. Його частка може бути 2...4 % від частки CO_2.

Отже виділятиметься на цій стадії переважно CO_2, невелика кількість H_2 та CH_4, можливі також домішки NH_2 та H_2S.

В традиційних технологіях зброджування усі ці гази опиняються у вихідному біогазі і погіршують його якість, а низьке значення pH середовища, сірководень та аміак дестабілізують подальший процес, оскільки пригнічують ріст метаногенів [15].

При зниженні парціального тиску водню кислотогенез сповільнюється і активізуються ацетогенні бактерії. Через це недоутворюються кислоти, які на подальших стадіях могли б бути конвертованими у метан. В результаті кінцевий вихід метану знижується.

Для недопущення цього на цій стадії потрібно вводити у ємність додаткову кількість водню, щоб піднімати його парціальний тиск і активізовувати кислотогенез.

За інформацією [20] за сприятливих умов стадія кислотоутворення триватиме не більше 10 годин. Ознакою завершення кислотогенезу є стабілізація pH середовища.

Групу ацетогенних мікроорганізмів ділять на два види. Перший вид виробляє ацетат, розкладаючи довголанцюгові жирні кислоти, леткі жирні кислоти, спирти. Наприклад пропіонова кислота розкладається за формулою

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2, \quad (1)$$

масляна кислота за формулою

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2. \quad (2)$$

При цьому виділяється значна кількість вуглекислого газу та водень. Другий вид виробляє ацетат шляхом відновлення вуглекислого газу воднем. Це відбувається переважно за формулою

$$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O. \quad (3)$$

Діяльність цих видів бактерій взаємопов'язана. Надзвичайно важливим при цьому є парціальний тиск водню. За низького парціального тиску активізується перший вид бактерій, який водень виробляє, проте недостатня кількість водню стримує діяльність другого виду бактерій. При високому парціальному тиску другий вид бактерій активізується, а діяльність першого виду пригнічується. Очевидно є його оптимальне значення, при якому обидва види бактерій є активними. За даними [20] таким оптимальним значенням є рівень парціального тиску 10 Па. За даними [15] зниження цього тиску спричиняє лише сповільнення другого виду бактерій, тоді як його підвищення, навіть незначне, призводить до повної зупинки діяльності першого. Тому в ємності потрібно підтримувати парціальний тиск водню не більше ніж 10 Па.

За даними [16] при анаеробному бродінні доцільно підтримувати окислювально-відновний потенціал середовища не нижче ніж 330 мВ. За нижчих значень утворення водню активізується. На стадії ацетогенезу це може спричинити суттєве інгібування процесу.

За низького значення цього потенціалу активізується також утворення сульфідів і, як результат, поява додаткової кількості сірководню в газоподібних продуктах бродіння.

Ацетогенез доцільно здійснювати при атмосферному тиску, коли CO_2 легше виділяється в газоподібну фазу.

Групу метаногенних мікроорганізмів (як і ацетогенних) також ділять на два види. Перший – розщеплює ацетат до метану та вуглекислого газу за формулою

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2. \quad (4)$$

Другий – відновлює вуглекислий газ до метану за формулою

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O. \quad (5)$$

Співвідношення між кількістю утвореного метану першим та другим видом бактерій складає 72 до 28.

Всередині цих видів метаногенні бактерії суттєво відрізняються між собою за властивостями. Тому їх ділять на три порядки, що включають кілька родин та родів. На сьогодні виділені та описані кілька десятків родів метанових бактерій цей список постійно поповнюється. Серед них є як мезофільні, так і термофільні, як автотрофи, так і гетеротрофи. Найбільш вивченими на сьогодні можна вважати:

Methanobacterium thermoautotrophicum, Methanosarcina barkerii, Methanobrevibacter ruminantium, Methanotrix, Methanobacterium kadomensis.

Загальною рисою їх є те, що вони дуже чутливі до коливань параметрів середовища. Перш за все вони чутливі до наявності кисню. Його концентрація вище ніж 0,01 мг/л спричиняє їх загибель. Вони дуже чутливі до коливань температури [18]. При термофільному режимі допустиме коливання складає ±0,2 °С. Вони чутливі до динамічних навантажень, тому не рекомендується занадто інтенсивне перемішування. Вони чутливі до значення pH середовища. Для нормального функціонування pH не повинно виходити за рамки 7,5...8,0.

Позитивний вплив на розмноження метаногенів здійснює присутність у невеликих кількостях таких мікроелементів, як калій, натрій, кальцій, магній, кобальт, мідь, бор, цинк, молібден.

Активізують метаболізм метаногенів біологічно активні добавки [12], зокрема «мелафен» (меламінова сіль біс(оксиметил)фосфінової кислоти. Показано експериментально [13], що присутність в органічних субстратах біостимуляторів типу BIOSTIM-SBCH_4 прискорює їх зброджування у 3...4 рази, при цьому концентрація метану у біогазі збільшується.

Метаногени в цілому є повільноростучими анаеробами. Проте, за даними [23], якщо їх відділити у просторі від кислотогенів і тим самим усунути їх антагоністичні стосунки, метаногени ростуть у кілька разів швидше. За даними [16] таким відділенням досягалась сумарна тривалість ацетогенезу і метаногенезу у межах трьох діб.

Існуючі технології зброджування дозволяють отримувати біогаз з вмістом CO_2 до 40 %, тобто паливо невисокої якості. Такий високий вміст CO_2 може бути пояснений тим, що для ефективного функціонування другого виду метаногенів, які відновлюють CO_2 до метану за допомогою водню (5), в метантенку недостатньо саме H_2 [11].

З підвищенням тиску розчинність CO_2 у воді збільшується. За даними [25] якщо тиск в метантенку підняти до 0,5 МПа, то CO_2, який виділяється внаслідок функціонування першого виду метаногенів (4), швидко переходить з вільної форми у зв'язану, перестає виділятися у вигляді газу, насичує осад і прискорює метаболізм другого виду метаногенів (5). Виділення метану при цьому не залежить від тиску, оскільки він має погану розчинність у воді і швидко переходить у вільний стан.

6. Обговорення результатів та формування нової технології стабілізації

Схема запропонованої технології представлена на рис. 1. Виходячи з викладеного гідроліз має відбуватися таким чином (рис. 1). До свіжого осаду з очисних споруд авіапідприємства додається частина рециркульованого збродженого осаду, взятого на виході з метантенка (як «закваска»), а також NaOH для початку лужного гідролізу. Суміш подається у герметичний гідролізатор 2. В цей час починається опромінювання осаду в гідролізаторі ультразвуком за допомогою ультразвукового диспергатора 1. Одночасно компресором 14 нагнітається всередину гідролізатора через барботер CO_2, який надходить з блоку очистки CO_2 5. Барботуючи через осад CO_2 накопичується у верхній порожнині гідролізатора над осадом і через вихідний клапан відводиться.

Клапан має підтримувати в гідролізаторі надлишковий тиск $0{,}5 \cdot 10^5$ Па, для контролю якого передбачено манометр 3. Додаткового газовиділення в гідролізаторі не передбачається, тому відведений CO_2 може направлятися на змішування з CO_2, отриманим на стадіях кислотогенезу і ацетогенезу та відводитись як товарний газ у накопичувальні ємності. Протягом гідролізу за допомогою теплогенеруючої установки 13 осад в гідролізаторі нагрівається до температури 53 °С (подальше бродіння при термофільному режимі). Після закінчення гідролізу на виході до осаду додається HCl для відновлення pH до значення 6,5...7,6.

При достатній інтенсивності обробки осаду тривалість гідролізу може не перевищувати 30 хв [20].

Гідролізований осад з pH 6,5...7,6 подається у ємність з барботером для кислотогенезу. В ємності встановлюється атмосферний тиск, а у барботер подається водень, який розпилюючись барботує крізь осад, перемішуючи його та збільшуючи свій парціальний тиск у ємності. Водень надходить від діафрагмового електрогенератору водню 11. Газоподібні продукти цієї стадії разом барботажним воднем збираються у верхній порожнині ємності і відводяться з неї через відвідну трубку. Ці продукти подаються на блок очищення CO_2 5, де відбувається очищення вуглекислого газу від домішок H_2, NH_2, CH_4, H_2S. Очищений вуглекислий газ направляється в накопичувальні ємності як товарний продукт. Частина CO_2 відбирається компресором 4 і нагнітається для барботування у гідролізатор 2. Теплогенеруюча установка 12 подає теплову енергію для стабілізації температури осаду в кислотогенній ємності. Протягом кислотогенної стадії здійснюється контроль за рівнем pH середовища. Зупинка зниження рівня pH є ознакою того, що стадія завершилася.

Після цього до осаду додається луг (NaOH) для відновлення pH середовища до значень 7,5...8,0.

Після кислотогенезу осад з рівнем pH=7,5...8,0 подається у ємність з барботером для ацетогенезу 6. В ємності встановлюється атмосферний тиск та окислювально-відновний потенціал на рівні 330 мВ. У барботер подається вуглекислий газ, який барботуючи перемішує осад і сприяє діяльності першого виду ацетогенів (1). CO_2 надходить з блоку очистки 5. Подавання CO_2 має відбуватися не надто інтенсивно, щоб не руйнувати фізичні контакти між ацетогенними бактеріями, оскільки при руйнуванні цих контактів їх розмноження сповільнюється.

Вуглекислий газ (барботажний та той, що виробляється на цій стадії) разом з вивільненим воднем збираються у верхній порожнині ємності, а далі відводяться через відвідну трубку. При постійній подачі та видалення CO_2, з ємності видалятиметься і H_2, що знижуватиме його парціальний тиск.

За допомогою теплогенеруючої установки 12 здійснюється температурна стабілізація осаду в ємності.

Видалений газ направляється у блок очищення CO_2 7, де вуглекислий газ очищується від домішок H_2. Очищений CO_2 відводиться у накопичувальні ємності як товарний продукт.

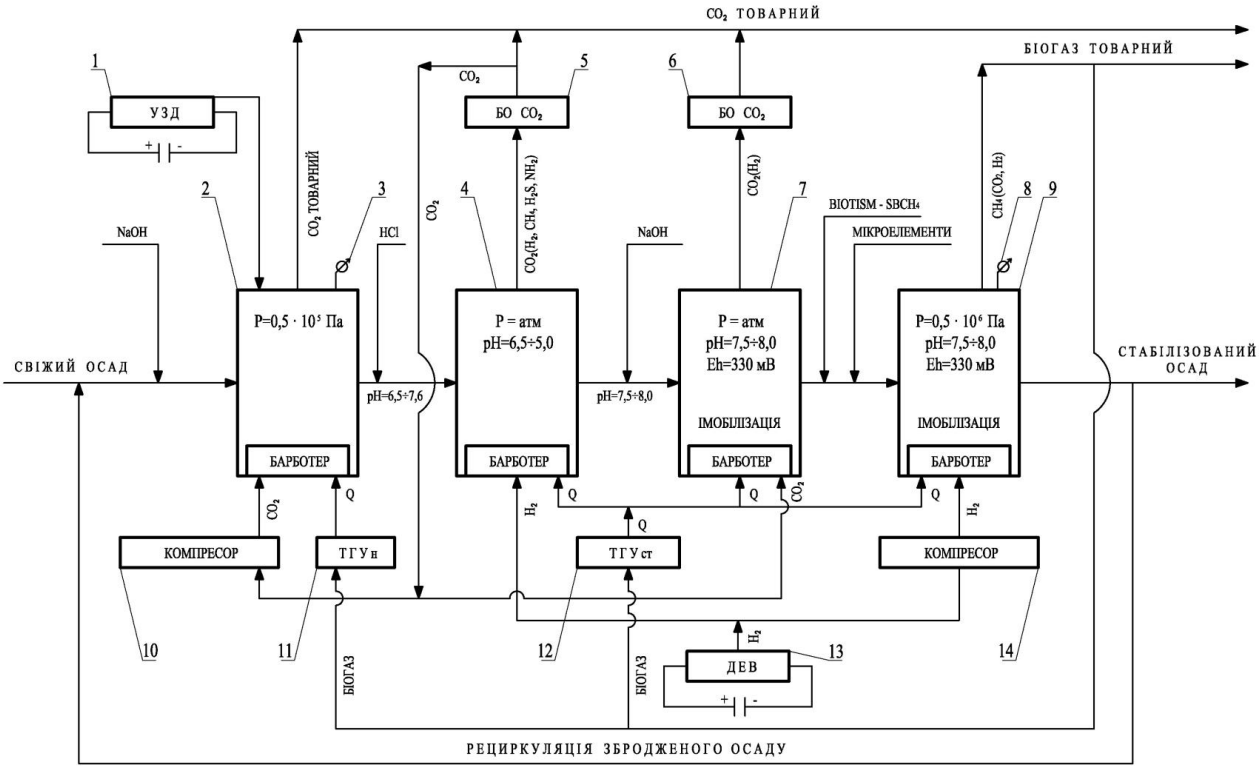

Рис. 1. Технологічна схема чотиристадійного анаеробного зброджування осадів стічних вод авіапідприємств: 1 — ультразвуковий диспергатор; 2 — гідролізатор з барботером; 3 — манометр для вимірювання тиску в гідролізаторі; 4 — ємність з барботером для кислотогенезу; 5 — блок очищення вуглекислого газу від H_2, NH_2, CH_4, H_2S; 6 — блок очищення вуглекислого газу від H_2; 7 — ємність з барботером для ацетогенезу; 8 — ємність з барботером для метаногенезу; 9 — манометр для вимірювання тиску у ємності для метаногенезу; 10 — компресор для нагнітання вуглекислого газу в гідролізатор; 11 — теплогенеруюча установка для поступового нагрівання осаду в гідролізаторі; 12 — теплогенеруюча установка для температурної стабілізації осадів у ємностях для кислотогенезу, ацетогенезу та метаноганезу; 13 — діафрагмовий електрогенератор водню; 14 — компресор для нагнітання водню у ємність для метаногенезу

Після ацетогенезу, який суттєво не змінює pH середовища, до осаду додається біостимулятор типу BIOSTIM-$SBCH_4$, а також мікроелементи (калій, натрій, кальцій, магній, кобальт, мідь, бор, цинк, молібден), після чого осад подається у ємність з барботером для метаногене-зу 8. Компресором 14 у ємність починає нагнітатися водень, який надходить від діафрагмового електрогенератору водню 13. Метан та невелика кількість вуглекислого газу, що утворюються в ємності, разом з введеним для барботажу воднем збираються у верхній її частині і відводяться через відвідний клапан у трубопровід транспортування біогазу. Цей клапан має бути налаштований на підтримання всередині ємності тиску 0,5 МПа. Для контролю цього тиску ємність обладнана манометром 9. За допомогою теплогенеруючої установки 12 здійснюється температурна стабілізація осаду в ємності протягом метаногенезу.

Частина готового біогазу відбирається з відвідного трубопроводу і направляється для спалювання в теплогенеруючі установки 11 і 12.

Після закінчення метаногенезу зброджений осад видаляється з ємності. Його невелика частина по рециркуляційному трубопроводу направляється на змішування з новою порцією свіжого осаду, який направляється у гідролізатор, в якості «закваски». Решта зброджeного осаду відводиться на зневоднення та подальше використання як органічного добрива.

7. Висновки

Одним з найбільш перспективним методом утилізації осадів стічних вод авіапідприємств, який відповідає як економічним та екологічним вимогам, можна вважати анаеробне зброджування в метантенках з отриманням екологічно безпечного органічного добрива та енергетично цінного біогазу.

В результаті виконаних досліджень:

1. Встановлено, що різні стадії анаеробного бродіння для інтенсивного протікання вимагають різних умов їх проведення.

2. Визначено, що одним з основних спільних моментів є відділення кожної стадії у просторі і проведення її в окремій ємності. При цьому в кожній ємності має забезпечуватися свій тиск середовища, свій рівень pH, додавання своїх добавок, що інтенсифікують процес тощо.

3. Запропоновано нову технологічну схему зброджування, на підставі якої описано нову технологію організації цього процесу. Ця технологія дозволяє зробити процес більш економічним та більш екологічним. А саме скоротити процес бродіння з 15-ти до 3-х діб, при цьому збільшити вихід біогазу на одиницю об'єму осадів та збільшити вміст метану у вихідному біогазі з 60 % до 95 %.

Література

1. Яковлев, С. В. Канализация [Текст] / 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 [Текст] / Р. В. Удалов, Л. В.Андреева // Ученые записки Института СХПР НовГУ. – 2006. – Т. 14. – С. 45–59.
3. Alrawi, R. Methane Production during Start-Up Phase of Mesophilic Semi-Continues Suspended Growth Anaerobic Digester [Text] / R. Alrawi, A. Ahmad, I. Norli, M. AK // International Journal of Chemical Reactor Engineering. – 2010. – Vol. 8, Issue 1. – P. 89. doi: 10.2202/1542-6580.2034
4. Бабаев, В. Н. Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов [Текст] / В. Н. Бабаев, Н. П. Горох, И. В. Коринько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 4, № 6 (52). – С. 59–65. – Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1427/1325
5. Фесюк, В. О. Оцінка перспектив добування біогазу з осадів стічних вод Луцьких міських комунальних очисних споруд [Текст] / В. О. Фесюк // Природа Західного Полісся та прилеглих територій. – 2010. – № 7. – С. 84–90.
6. Altas, L. Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic granular sludge [Text] / L. Altas // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 162. – P. 1551–1556. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.048
7. Волова, Т. Г. Биотехнология [Текст] / Т. Г. Волова. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. – 252 с.
8. Лісіцин, Є .Ф. Знезаражування осаду каналізаційних стоків з отриманням біогазу у багатосекційних метантенках [Текст] / Є .Ф. Лісіцин, С. Й. Шаманський, В. В. Почтовенко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4. – С. 107–110.
9. Трахунова, И. А. Повышение эффективности анаеробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. А. Трахунова. – Казань, 2014. – 19 с.
10. Караева, Ю. В. Обзор биогазовых технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания [Текст] / Ю. В. Караева, И. А. Трахунова // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 109–127.
11. Ковалев, В. В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии [Текст] / В. В. Ковалев, Д. В. Унгуряну, О. В. Ковалева // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 1. – С. 102–114.
12. Барский, Е. Л. Эффект мелафена на развитие культур цианобактерий и зеленых микроводорослей в стрессовых условиях [Текст] / Е. Л. Барский, И. О. Шандиева, Я. В. Саванина и др. / Вестник Московского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 15–20.
13. Liao, B.Q. Anaerobic membrane bioreactors [Text] / B. Q. Liao, J. T. Kraemer, D. M. Bagley // Application and research directions. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 36. – P. 489–530.
14. Ungureanu, D. Biological wastewater treatment using fixed film “Inovations in the field of water supply, sanitation and water” [Text] / D. Ungureanu // Psper of Conference of the young scientists and researches. Bucharest, 2005. – P. 97–102.
15. Корзникова, М. В. Стратегические аспекты устойчивого управления отходами животноводства и птицеводства в целях минимие зации негативного воздействия на окружающую среду [Текст]: автореф. дис. ... канд. биолог. наук / М. В. Корзникова. – Москва, 2006. – 38 с.
16. Гюнтер, Л. И. Метантенки [Текст] / Л. И. Гюнтер, Л. Л. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991. – 280 с.
17. Ziemiński, K. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms [Text] / K. Ziemiński, M. Frąc // African Journal of Biotechnology. – 2012. – Vol. 11, Issue 18. – P. 4127–4139. doi: 10.5897/ajbx11.054
18. Chae, K. J. The effect of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure [Text] / K. J. Chae, A. Jang, S. K. Yim, I. S. Kim // Bioresource Technology. – 2007. – Vol. 99, Issue I. – P. 1–6. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.063
19. Möller, U. Entseuchung von Klarschlam. Eine Standartbestimmung 1987 [Text] / U. Möller // Korrespondenz Fbwasser. – 1988. – Vol. 1. – P. 24–30.
20. Данилович, Д. А. Влияние предварительной обработки осадков сточных вод на полноту протекания процесса метанового сбраживания [Текст] / Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, М. В. Кевбрина, Д. В. Гусев // Вода: технологии, материалы, оборудование, экология. – 2009. – № 2. – С. 24–26.
21. Предзимірська, Л. М. Кавітаційне очищення природних і стічних вод від органічних та біологічних забруднень [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. М. Предзимірська. – Івано-Франківськ, 2015. – 21 с.
22. Pereira, M. A. Mineralization of LCFA associated with anaerobic sludge: kinetics, enhancement of methanogenic activity, and effect of VFA [Text] / M. A. Pereira, D. Z. Sousa, M. Mota, M. M. Alves // Biotechnology and Bioengineering. – 2004. – Vol. 88. – P. 502–511. doi: 10.1002/bit.20278
23. Welsh, F. Untresuchungen zur Optimisierung der zweistufigen anaeroben Klarschlamm [Text] / F. Welsh // GFW-Wasser-Abwasser. – 1986. – Vol. 3. – P. 109–117.
24. Pereira, M. A. Accumulation of long chain fatty acids onto anaerobic sludge under steady state and shock loading conditions: effect on acetogenic and methanogenic activity [Text] / M. A. Pereira, A. J. Cavaleiro, M. Mota, M. M. Alves // Water Sci. Technol. – 2003. – Vol. 48. – P. 33–40.
25. Patent USA 4722741 [Text] / MKI CO2 F11/04, HKI 48/197A, 1988.