УДК 628.355

Карачун Володимир Володимирович
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри біотехніки та інженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Карачун Владимир Владимирович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры биотехники и инженерии
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Karachun Volodymyr
Doctor of Technical Science, Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ФЕРМЕНТАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ФЕРМЕНТАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

ANALYSIS OF CONSTRUCTION SOLUTIONS OF ENZYMATIC INSTALLATIONS FOR THE PROCESSES OF BIOGASE RECEIVING

Анотація. *Розглядється можливість використання у агропромисловому комплексі біогазових установок. Аналізується стан шкідливих викидів газу у навколишнє середовище. Пропонується використання анаеробних фільтрів в установках. Наводяться конструктивні особливості анаеробних біореакторів.*

Ключові слова: *біомаса, метантенк, гібридний біореактор, біогазові виробництво, мікроорганізми, метанова ферментація.*

Аннотация. *Рассматриватеся возможность использования в агропромышленном комплексе биогазовых установок. Анализируется состояние вредных выбросов газа в окружающую среду. Предлагается использование анаэробных фильтров в настройках. Приводятся конструктивные особенности анаэробных биореакторов.*

Ключевые слова: *биомасса, метантенк, гибридный биореактор, биогазовое производство, микроорганизмы, метановая ферментация.*

Summary. *Consider using biogas plants in the agro-industrial complex. The state of harmful emissions of gas into the environment is analyzed. It is suggested to use anaerobic filters in the settings. The constructive features of anaerobic bioreactors are given.*

Key words: *biomass, methane tin, hybrid bioreactor, biogas production, microorganisms, methane fermentation.*

Вступ. Застосування технологій біогазового виробництва, обумовлене необхідністю опанування нових джерел енергії, навіть в умовах, коли традиційні палива займають домінуюче положення, потрібно обґрунтувати з економічної точки зору. Сьогодні на енергетичному ринку країн Європи, потенційне використання біогазу може зайняти досить помітну позицію.

Агропромислове виробництво є джерелом значної кількості шкідливих викидів газів та органічних відходів у навколишнє середовище, чим істотно погіршує стан екології довкілля. Аналізуючи сучасну ситуацію з наведенням лише трьох складових забруднень атмосфери, слід підкреслити, що аналогічні втрати від такої діяльності у сільській місцевості не співвідносяться з відповідними у промисловості

за питомою вагомістю валових продуктів аграрної та промислової галузей. Тому технології, що полегшують антропогенний вплив на екологію, повинні активно впроваджуватись у сільській місцевості. Саме процеси метаногенезу біомаси дозволять ефективно протистояти збільшенню шкідливої емісії газів сільськогосподарського походження.

Вміст органічних речовин у біомасі, що піддається ферментації, становить: у стоках — 0,04% –0,06%, у харчових відходах — 15%, у гної та гноївці — 15% – 20%. Виробництво біогазу суттєво залежить від складу вихідного матеріалу, тобто речовини, що завантажується до ферментаційної камери. Сировиною, яку можна піддати метановій ферментації, можуть бути практично всі відходи, що містять органічні компоненти, а особливо відходи рослинництва та виділення тварин. Розрізняють шість видів ферментації біомаси, яку проходять одночасно або послідовно: амонієва; азотна, вивільняюча азот, якій підлягають азотні складові сировини; окиснювальна; кислотна; метанова, якій піддаються вуглеводні із сировини, зокрема целюлоза. Особливої уваги заслуговує метанова ферментація, в результаті якої вивільнює горючий газ — метан, а також амонієва, продуктом якої є аміак у вигляді розчинних амонієвих солей. Ефективний перебіг метанової ферментації органічних речовин потребує виконання чотирьох основних умов: безкисневої атмосфери; відповідної температури зброджуваної маси; слаболужної реакції середовища; присутності бактерій, які продукують метан.

Виділення метану з речовини, що піддається ферментації, проходить лише в анаеробних умовах, тобто тоді, коли нема доступу кисню (повітря). Тому ферментація повинна проходити у спеціальних резервуарах, закритих ферментаційних камерах та іншому подібному обладнанні. Дуже важливим фактором ефективного перебігу процесу ферментації є температура маси, що зброджується. Метанова ферментація починається при температурі 6 °С. При нижчій температурі виділення метану припиняється. Одночасно із зростанням температури швидко збільшується кількість газу, що виділяється. Так, при температурі 30 °С виділення біогазу відбувається в 12 разів швидше, ніж при температурі 10 °С. При використанні мезофільних бактерій раціональним температурним режимом вважають 30 °С – 35 °С, термофільних бактерій — 55 °С – 60 °С. Термофільні бактерії більш продуктивні, ніж мезофільні. Вони протягом часу експозиції (12–14 днів) мінералізують стільки ж органічних речовин, скільки мезофільні бактерії за 21–36 днів. Завдяки цьому при однаковій кількості виробництва біогазу за день місткість ферментаційних резервуарів може бути значно меншою. Час експозиції залежить також від виду матеріалу, що завантажується. Органічні речовини розпадаються з різною швидкістю. Найдовший час експозиції буде при підвищеному вмісті целюлози та геміцелюлози, більш короткий — у випадку наявності в сировині білків та жирів, а найкоротший — для цукрів. У випадку вмісту речовин, що важко розкладаються (таких як целюлоза, геміцелюлоза та лігнін), можна застосовувати двоступеневу ферментацію. Прискорити процес можна шляхом подрібнення або розведення маси. Разом з тим, враховуючи необхідність підтримання більш високої температури маси, що бродить, витрати теплової енергії при реалізації термофільних процесів є значно вищими. При низькій температурі навколишнього середовища та недостатній ізоляції резервуару витрати теплової енергії можуть бути настільки великими, що біогазу, який виробляється, не вистачить для обігрівання бродильної маси. У зв'язку із цим в європейських кліматичних умовах ферментаційні камери звичайно працюють у мезофільному діапазоні температур, тобто при 30 °С – 35 °С:

Суттєве значення в процесі бродіння мають мікроорганізми. Тому головне питання — це підбір оптимального складу мікроорганізмів шляхом їх генетичного модифікування і оптимізації. Для забезпечення метанової ферментації необхідна наявність в речовині метаногенних мікроорганізмів. Ці мікроорганізми розвиваються лише у сприятливих умовах — в анаеробному слабколужному середовищі при температурі 6 °С – 70 °С. Для поліпшення перебігу ферментації необхідне прищеплення відповідних колоній бактерій. Бажано також стимулювати початок ферментації шляхом додавання вже ферментованого субстрату, тобто прищепити сировині бактерії відповідного штаму, які реалізують цей процес. З метою уніфікації температури органічної речовини, що піддається ферментації, а також розповсюдження мікроорганізмів в біомасі проводять систематичне її перемішування. Перемішування зброджуваної речовини попереджає місцеву ферментацію, що викликається патогенами. Ферментація біомаси, як правило, проходить три етапи: гідролізу, кислої та метанової ферментації. Через те, що процес відбувається завдяки бактеріям, їм необхідно створити відповідні умови, а саме: температуру, оптимальну для даного штаму бактерій; час експозиції, визначений за часом притоку сировини до біогазового реактора (його підбирають таким, щоб попередити вимивання з нього бактерій); відповідне завантаження порцією додаткових матеріалів (надто високе призводить до перевантаження системи, а надто мале — до згасання реакції); вміст інгібіторів процесу, таких як антибіотики або засоби охорони рослин.

Дехто, помилково вважає, що головним призначенням ферментаційних установок є отримання біогазу, який служить додатковим джерелом місцевого енергопостачання. Оцінюючи з цієї точки зору економічну ефективність переробки біомаси, вони не враховують, що біогазові установки є альтернативним обладнанням для переробки гною і відходів. Тому витрати на їх створення і експлуатацію

повинні бути віднесені до заходів знезаражування гною, виробництва високоякісних добрив і захисту навколишнього середовища. У цьому випадку біогазові установки завжди будуть мати позитивний економічний ефект. Розрахунки показують, що, незважаючи на значні капітальні вкладення, термін окупності промислової біогазової установки складає біля трьох років.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Великі обсяги стічних вод потребують застосування інтенсивних технологій очищення. Одним із методів обробки стоків є анаеробне зброджування, яке дозволяє переробляти як високо, так і низько-концентровані стоки. В процесі анаеробного очищення беруть участь специфічні мікробні асоціації, представлені мікроорганізмами-гідролітиками, ацетогенами та метаногенами. Продуктами життєдіяльності асоціацій є, зокрема, вуглекислий газ та метан — біогаз, придатний для використання в когенераційних системах. Ступінь деградації забруднень та об'єм 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 непереброблених речовин. Разом з тим, анаеробні методи очищення стічних вод 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 фільтрів, що відрізняються компактністю, підвищеною стійкістю проти негативних впливів та високою ефективністю.

Конструктивні особливості анаеробних біореакторів. Конструктивні особливості анаеробних біореакторів обумовлені видом та обсягами відходів, що переробляються, необхідним ступенем деградації, місцем анаеробного біореактора у технологічній послідовності очищення. В роботі [1] надано одну з набільш детальних класифікацій, показану на рис. 1.

Поширення різних типів реакторів показано на рис. 2.

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 кг ХПК/м^{3}добу. [1]

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.

Контактний реактор (*Contact Reactor).* 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,

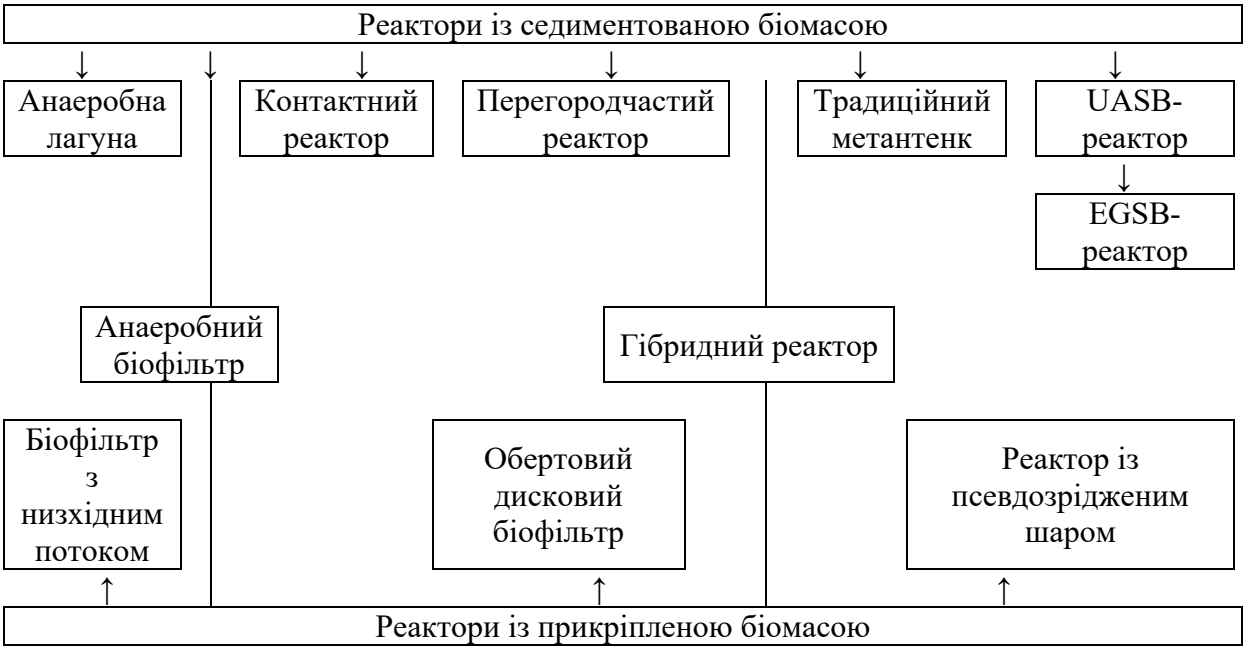

Рис. 1. Класифікація анаеробних біореакторів

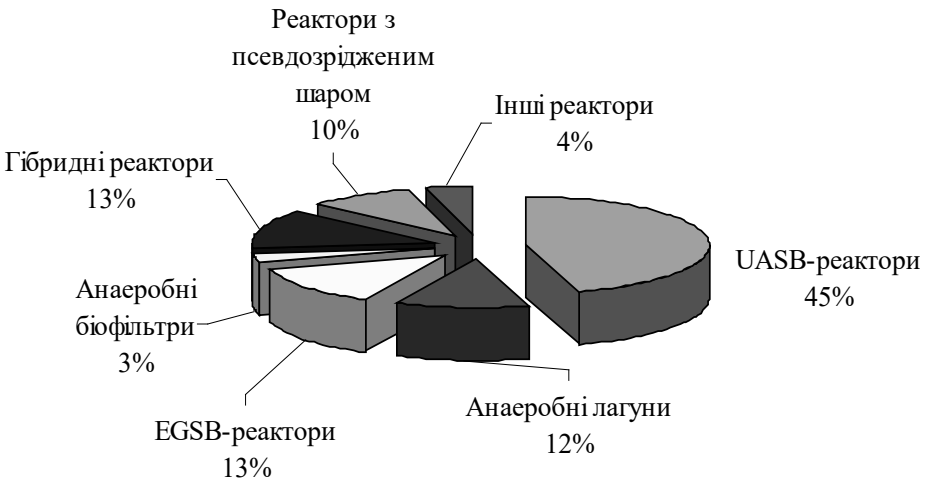

Рис. 2. Поширення різних типів реакторів

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 стічних вод, які мають 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 стічних вод, придатних до переробки.

Перегородчастий реактор (рис. 3) *(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 [1].

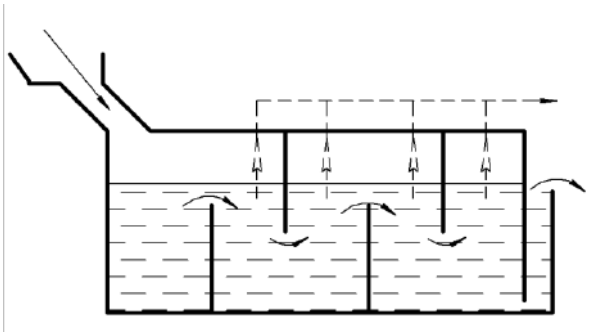

Рис. 3. Перегородчастий реактор

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.

UASB — реактор (рис. 4) *(Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor)* — реактор із висхідним потоком рідини крізь шар активного анаеробного мулу. В основу покладено здатність мікроорганізмів самочинно утворювати щільні гранули або флокули. Гранули складаються, в основному, із метаногенів роду Metanosaete. [2].

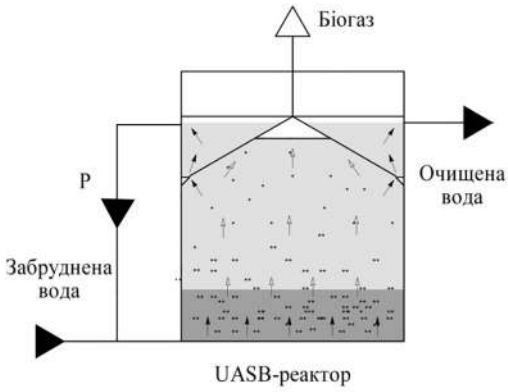

Рис. 4. Схема UASB-реактора

Розділення газу, очищеної води та гранульованої біомаси здійснюється за допомогою спеціального мулогазовідділюючого пристрою. Утримання гранульованої біомаси здійснюється також завдяки її високій седиментаційній здатності [3]. UASB-реактори виявляють значну чутливість до складу стічних вод, особливо наявності в них 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.

Біореактор із розширеним шаром активного мулу (рис. 5) *(Expandeed G Sludge Bed Reactor)*. Принциповою відмінністю даного типу реакторів від UASB-реактора є більша швидкість висхідного потоку рідини за рахунок рециркуляції для інтенсифікації масообміну між гранулами мулу та стічними

водами. За поширенням ця високоінтенсивна конструкція поступається лише UASB-реакторам.

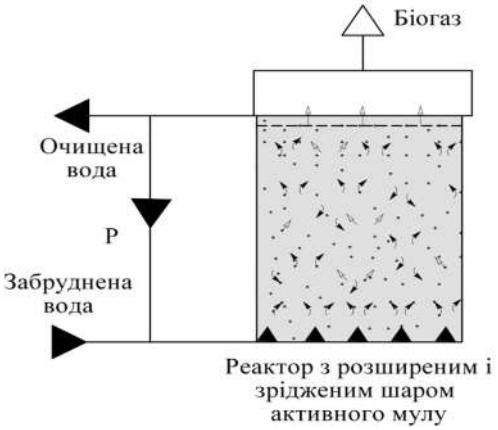

Рис. 5. Біореактор із розширеним шаром активного мулу

Такі реактори придатні для переробки низькоконцентрованих стоків у широкому діапазоні температур. [3]

Біореактор із псевдозрідженою біомасою (рис. 6) *(Fluidized Bed Reactor)* — один із найбільш продуктивних біореакторів із закріпленою мікрофлорою за рахунок більш повного контакту забруднень із біомасою.

Псевдозрідження відбувається за рахунок висхідного потоку рідини та бульбашок біогазу, що виділяється. В таких біореакторах обробляють низькоконцентровані стоки із розчиненими або дрібнодисперсними забрудненнями.

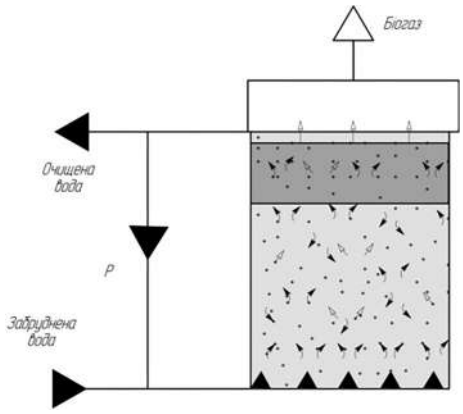

Рис. 6. Біореактор із псевдозрідженою біомасою

Слід відмітити, що підтримання флокул у псевдозрідженому стані потребує додаткових енерговитрат.

Анаеробні біофільтри. Сутністю анаеробного фільтра та головною відмінністю його від інших анаеробних біореакторів є наявність завантаження з інертного носія, розміщеного у біореакторі без можливості виносу його потоком рідини, що протікає. На носієві 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 на рис. 7.

Анаеробні фільтри з низхідним потоком DSFF (Downflow Stationary Fixed Film reactor) представлено на рис. 7, а. Стічні води подаються 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.

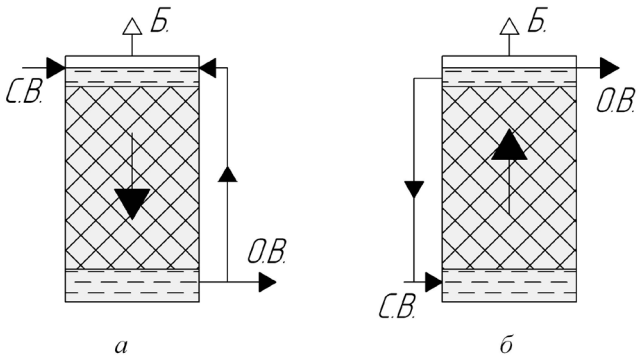

Рис. 7. Анаеробні фільтри: а — із низхідним потоком; б — із висхідним потоком; С.В. — стічна вода; О.В. — оброблена вода; Б. — біогаз

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 якостями. Найчастіше застосовують м'які матеріали із високою внутрішньою пористістю не менше 200 м^2 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 AF (Anaerobic Filter). Принципову схему анаеробного фільтра із висхідним потоком зображено на рис. 7 б. 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,

Таблиця 1

Основні параметри роботи біореакторів

Тип реактора	Середня концентрація біомаси в реакторі, кг/м^3	Питома площа поверхні завантаження	Нижня границя концентрації в стічній воді, ХСК/м^3	Продуктивність, ХСК/м^3/добу	Мінімальний час обробки, год
1	2	3	4	5	6
Традиційний метантенк	0,5–3	-	10	0,5–5	190–240
Контактний реактор	5–10	-	2–3	3–8	24
UASB — реактор	20–40	-	0,3	10–25	2–3
ESGB — реактор	25–40	-	0,3	30–40	1–2
Анаеробній биофильтр	5–20	70–300	0,3	10–15	8–12
DSFF-біофільтр	3–15	60–200	1–2	10–12	24
Реактор із псевдо-зрідженим шаром	10–40	1000–3000	0,3	30–40	0,5
Гібридний реактор	20–30	70–300	0,3	15–25	2–3

а і у флокулах та гранулах [1]. 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 [2]. Якщо для фільтрів із низхідним потоком характерне застосування переважно засипних завантажень, то для висхідних потоків більш прийнятними є площинні завантаження з дещо меншою питомою поверхнею (від 100 м^3/м^2). Така форма завантаження, до того ж, сприятиме більш повному виведенню біогазу з об'єму анаеробного фільтра [4–5]. Основні параметри роботи біореакторів показано у таблиці 1. [3]

Якщо для фільтрів із низхідним потоком характерне застосування переважно засипних завантажень, то для висхідних потоків більш прийнятними є площинні завантаження з дещо меншою питомою поверхнею (від 100 м^3/м^2). Така форма завантаження, до того ж, сприятиме більш повному виведенню біогазу з об'єму анаеробного фільтра.

Гібридний реактор (Hybrid Reactor). Найчастіше гібридні реактори представляють поєднання UASB — реактора із анаеробним фільтром, що дозволяє скористатися перевагами обох конструкцій — високою концентрацією біомаси, хорошими умовами перемішування, продуктивністю, компактністю та простотою 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.

Висновки. Для підвищення концентрації біомаси у біореакторі створюють умови, що сприяють природному утворенню гранул бактерійної біомаси під впливом чинників середовища і гідродинамічного режиму. Для накопичення в середовищі ацетату на початку процесу встановлюють невеликі швидкості завантаження біореактора, щоб створити умови для утилізації і трансформації всіх вищих жирних кислот. Крім того, в середовищі повинні бути іони кальцію, які сприяють флокуляції. За таких умов в нижній частині біореактора поступово накопичуються гранули величиною 0,5 мм — 2,5 мм з добрими властивостями до седиментації. У реакторі не повинно бути механічного перемішування для того, щоб не деформувати і не зруйнувати гранули. У верхній частині біореактора необхідно встановлювати пристрій сепарації, в якому гранули відділяються від рідкої фази і повертаються в нижню частину апарату. Крім того, в пристрої сепарації відділяється також газова фаза. У оптимальних умовах біореактор забезпечує добове завантаження ХСК до 15 кг/м^3, повна заміна субстрату відбувається за 4 години при ступені очищення 70% . — 90% .

Література

1. Калюжный С. В. Высокоинтенсивные анаэробные технологии очистки промышленных сточных вод / Катализ в промышленности. — 2004. — № 6. — 42–50 с.

2. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем / [Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. И. Муратова, А. А. Ермаков]. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, — 2005. — 80 с.

3. Колесников В. П., Вильсон Е. В. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях; под ред. Ак. ЖКХ РФ В. К. Гордеева-Гаврикова. — Ростов-на-Дону: Юг, 2005. — 212 с.

4. Биологическая очистка сточных вод и отходов сельского хозяйства: Динамические модели и оптимальное управление / [Гарнаев А. Ю., Седых Л. Г., и др.]; под ред. М. Ж. Кристапсонса. — Рига: Зинатне, 1991. — 173 с.

5. Біогаз. Енергія майбутнього. Сучасний стан досліджень / Маслич Б. В., Маслич В. К.// Ринок інсталяцій. — 2001. — № 2. — С. 34–38.