

Бінарна лекція «Біоочищення відходів сільського господарства. Перспективи використання біотехнологій»

План

1. Види відходів сільського господарства.
2. Класифікація методів утилізації відходів сільського виробництва.
3. Традиційні методи.
 - 3.1 Використання гною як органічного добрива.
 - 3.2 Мінералізація органічних речовин у ґрунті та водоймищах.
 - 3.3 Включення гною до раціонів сільськогосподарських тварин.
 - 3.4 Вермікультивування.
4. Нетрадиційні методи.
 - 4.1 Біотехнологія одержання біогазу шляхом анаеробного збродження відходів.
 - 4.2 Біометаногенез та його етапи.
 - 4.3 Фактори, які впливають на біометаногенез і їх оптимізація.
 - 4.4 Шляхи вдосконалення біогазового виробництва.

Вступ

Лектор 1: При експлуатації тваринницьких ферм і комплексів виникає багато проблем — санітарно-гігієнічних, екологічних, економічних, соціальних тощо. Це зумовлено передусім значною концентрацією тварин на обмеженому просторі та порушенням рівноваги між поголів'ям і площею земельних угідь, що супроводжується накопиченням великої кількості гною, стічних вод та інших органістких відходів у розрахунку на одиницю земельної площі.

Лектор 2: Гній містить значну кількість патогенних мікроорганізмів, яєць і личинок гельмінтів, насіння бур'янів, солей важких металів та інших ксеенобіотиків. Потрапляючи у ґрунт і водоймища, гнойова рідина спричиняє забруднення ґрунтових вод, біологічне зараження ґрунту патогенними мікроорганізмами та викликає масові отруєння водних організмів.

Такі компоненти відходів, як метан, діоксид вуглецю, аміак і сірководень, забруднюють повітря. Метан, потрапляючи в атмосферу, зумовлює парниковий ефект, який призводить до глобальних змін клімату.

Лектор 1: Проблеми поглиблюються тим, що сільськогосподарські угіддя як біологічні системи утилізації можуть сприймати підвищені дози органічних добрив у вигляді гною в обмеженій кількості. Критерієм є вміст азоту, максимально допустима концентрація якого складає 250–300 кг/га.

Таким чином, відходи сільського господарства забруднюють навколишнє середовище як органічними, так і біогенними елементами. На

його частку припадає 43–66 % загального біологічного навантаження на природні системи. Для усунення цих негативних явищ необхідно застосовувати різні методи очищення відходів сільського господарства.

1. Види відходів сільського господарства

Лектор 2: Огляд сільського господарства дозволяє виділити в ньому багатоструктурну мережу, в якій господарська діяльність поділяється на два головних напрямки: рослинництво і тваринництво.

Лектор 1: Відходи від рослинництва, в основному, утворюються в період жнив рослин, овочів, фруктів і їх первинній обробці, необхідної для подальшого зберігання, або транспортуванні. Відходи, що залишалися на полях такі, як солома, гичка, листя та інші залишки, і раніше не обходила стороною утилізація.

Лектор 2: Відходи від тваринництва, до яких відносяться: роги і копита, кістки та шкури, і самі об'ємні - це гній, що походить від курей, овець, свиней, корів та інших тварин, господарства прагнули і прагнуть використати, в першу чергу, для корисних цілей [1].

2. Класифікація методів утилізації відходів сільського виробництва

Лектор 1: Усі існуючі методи утилізації відходів тваринництва умовно можна поділити на дві групи: традиційні і нетрадиційні.

Лектор 2: При традиційних методах для утилізації використовують такі природні біологічні системи, як ґрунт і водоймища. Утилізація здійснюється біологічними агентами (об'єктами) – мікроорганізмами, дощовими черв'яками, членистоногими тощо. Вибір біологічної системи суттєво залежить від консистенції гнойової біомаси, яка, залежно від технології утримання і гноєвидалення, може бути: твердою (вологість до 80 %), напіврідкою (вологість 81–90 %) і рідкою (вологість більше 91 %) [2].

Іншим способом є вермікультування з використанням біологічних агентів – аеробних мікроорганізмів і дощових черв'яків [1].

Лектор 1: До нетрадиційних методів належить утилізація гною шляхом метанового зброджування [2].

3. Традиційні методи

3.1 Використання гною як органічного добрива

Лектор 2: Найбільш розповсюдженим методом утилізації гною є використання його для покращення родючості ґрунтів. Зумовлено це тим, що в сухій речовині гною міститься значна кількість азоту (1,9–6,5 %), калію (1,0–2,9 %), фосфору (0,2–2,7%) і органічної речовини (70–85 %). Крім цього, гній є джерелом гумусу – основного фактора родючості

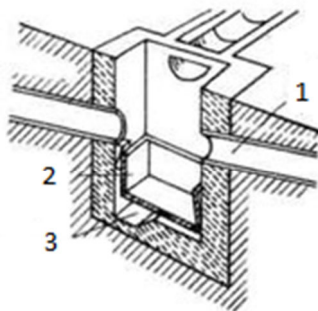
ґрунтів. У середньому 1 т гною дає 40–50 кг гумусу. Тому гній позитивно впливає на родючість, фізико-хімічні, агрофізичні та біологічні властивості ґрунту. Як джерело макро- і мікроелементів, вуглекислого газу, гній суттєво поліпшує баланс біогенних елементів у ґрунті [3].

Цей метод використовують в основному для утилізації твердої фракції гною (підстилковий гній) вологістю не вище 70 %. Його складують на спеціальних майданчиках для накопичення, карантинування і біотермічного знезараження. Біотермічний метод базується на утворенні в знезаражуваній масі високої (60 °С) температури і витримуванні протягом одного місяця у теплий період року і два місяці – у холодний. Якщо вологість гною перевищує 70 %, період витримування треба збільшити до 5–6 місяців. Після цього гній вивозять на поля під заорювання [1].

У ґрунті органічні речовини гною трансформуються автотрофними мікроорганізмами й іншими біологічними об'єктами (черв'яками, членистоногими). Неорганічні речовини адсорбуються частинками ґрунту або осаджуються, але не руйнуються. Особливо небезпечні стосовно цього важкі метали, тому їх кількість у ґрунті суворо лімітується.

Рідкий гній (безпідстилковий ВРХ і гнойові стоки свинарських комплексів) спочатку розділяють у відстійниках на тверду фракцію і рідку або стічні води. Тверда фракція складається для біотермічного знезараження і використовується як органічне добриво (рис. 1).

Рідка фракція теж використовується як рідке органічне добриво для поливу сільськогосподарських культур. При зрошуванні стічними водами відбувається їх ґрунтове доочищення, що створює сприятливі умови для охорони навколишнього середовища [4].



1 – асфальт-стальна труба, 2 – щільно закритий відстійник, 3 – місце для вмчерпування
Цегляний або бетонний гноєзбірник з окремими відсіками та отворами для відкачування рідини



1 – відкачка, 2 - переливання у суміжний відсік, 3 - введення у вигляді хрестовини з пробками на кінці, 4 - відстой, 5 - пробки.

Гноезбірники у вигляді групи секцій, викладених з фасонних каменів і розміщених в загальній залізобетонній обоймі, з переливами з секції в секцію

Рис. 1 – Види гноезбірників

Лектор 1: Широке розповсюдження методу гальмується санітарно-гігієнічними та економічними вимогами. Так, патогенні мікроорганізми, які містяться в гнойовій біомасі, мають властивості тривалого збереження в зовнішньому середовищі і можуть бути причиною епідемій та епізоотій.

Лектор 2: Забезпечення ветеринарно-санітарного благополуччя у цьому випадку можна досягти за рахунок знезараження відходів тваринництва термічною стерилізацією при високій температурі.

Лектор 1: Але це є енергоємним заходом [1].

Значні економічні проблеми пов'язані з витратами на видалення, транспортування, зберігання і використання гною в рослинництві, а також на знезараження його термічною стерилізацією [2].

3.2 Мінералізація органічних речовин у ґрунті та водоймищах

Лектор 2: Цим методом утилізують рідку фракцію, тобто стічні води.

Процес утилізації відбувається за рахунок життєдіяльності різних груп організмів (бактерій, грибів, водоростей, найпростіших, черв'яків і членистоногих), які використовують органічні та неорганічні сполуки стічних вод як поживні речовини і джерело енергії. Аеробні мікроорганізми за участю кисню повітря перетворюють органічні речовини на мінеральні сполуки – аміак, діоксид вуглецю і воду.

Серед відомих методів очищення стічних вод біологічне знезараження залишається найбільш доступним і надійним у санітарному відношенні [5].

Існують дві великі групи аеробних процесів біологічного очищення стічних вод – екстенсивні та інтенсивні.

До екстенсивних належать методи, не пов'язані безпосередньо з керованим культивуванням мікроорганізмів – це поля зрошення, поля фільтрації, біоставки. Мікроорганізми, які знаходяться у верхніх шарах ґрунту полів зрошення і фільтрації або у воді біоставків, утворюють біоценози, за рахунок діяльності яких проходить очищення води.

В основі інтенсивних способів лежить діяльність активного мулу або біологічної плівки, тобто природно виниклого біоценозу, який формується на конкретному виробництві залежно від складу стічних вод і вибраного режиму очищення [6].

Формування біоценозу – процес досить тривалий і проходить постійно під час очищення стічних вод у спеціальних спорудах – аеротенках або біологічних фільтрах.

Аеротенки – це бетонні або залізобетонні резервуари, крізь які повільно протікає суміш активного мулу і попередньо відстояної стічної рідини. В них очищення стічних вод відбувається за допомогою активного мулу (рис. 2). Активний мул – це субстрат у вигляді темно-коричневих пластівців і складається на 70 % з природної асоціації аеробних мікроорганізмів (різних бактерій і найпростіших) та 30 % твердих частинок неорганічної природи. На активному мулі адсорбуються і окислюються за участю кисню повітря органічні речовини стічних вод. Суміш стоків і активного мулу безперервно аерується для підтримки мулу в завислому стані та подачі кисню.

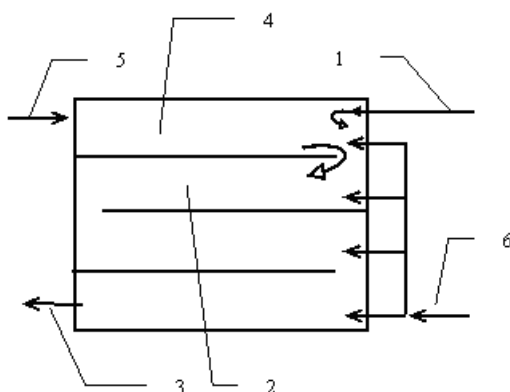


Рис. 2 – Технологічна схема аеротенка – витиснювача

1 – подача стічних вод від первинних відстійників; 2 – коридори (зона аерації) аеротенка; 3 – відвід суміші очищеної води та відпрацьованого активного мулу; 4 – зона регенерації; 5 – підвід до регенератора зворотного активного мулу; 6 – підвід стисненого повітря.

Аеротенки працюють в комплекті з відстійниками, в яких осаджується мул, що накопичується у великих кількостях. Частина активного мулу знову повертається у систему очищення, а надлишковий активний мул, який утворився в результаті росту мікроорганізмів, надходить на мулові майданчики з подальшим вивезенням його після зневоднювання на поля.

Біологічні фільтри – це металеві або залізобетонні резервуари, заповнені фільтрувальним матеріалом (шлаком, керамзитом, гравієм, пластмасою, щебінкою та ін.). Мікроорганізми у них знаходяться в нерухомому стані, закріплені на фільтрувальному матеріалі (носії) у вигляді біологічної плівки.

Біологічна плівка – це об'єкти зі складною структурою з живих і мертвих клітин, клітинних фрагментів і позаклітинних полімерів, які закріплені на поверхні. В середині біологічних плівок міститься суміш популяцій, що постійно змінюється. На поверхні біоплівки відбувається активне розмноження клітин, тому що тут найвища концентрація субстрату. Ближче до поверхні носія концентрація субстрату стає

лімітуючою, що є причиною руйнування внутрішньої структури біоплівки. Значна частина біоплівки втрачається через ерозію поверхні під впливом сил потоку рідини, або її відриву внаслідок розшарування. Регенерація біоплівки під час процесу здійснюється за рахунок відриву та віднесення її частини і розвитку на звільненому місці нової, більш активної.

Стічні води надходять зверху і повільно проходять вниз через біофільтри, де відбувається мінералізація органічних речовин, а в щілини між гранулами знизу вгору надходить повітря природним шляхом або примусово (аерація). Потужність біологічних фільтрів залежить від площі поверхні наповнювача (рис. 3) [1].

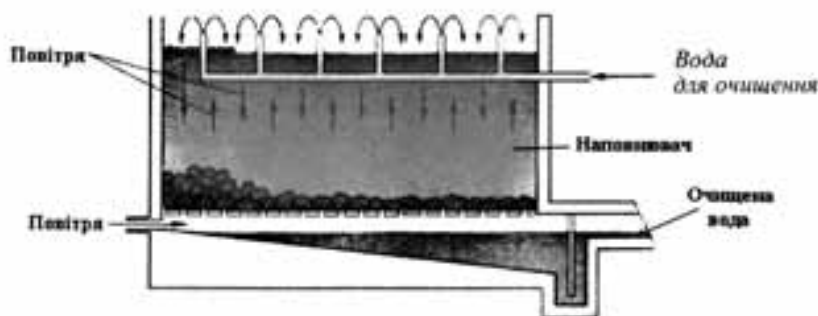


Рис. 3 - Біофільтр

При очищенні органічних відходів застосовують також біологічні ставки – водоростеві, рачкові, рибоводні.

Недоліком є повна безконтрольність процесу і те, що функціонують вони лише у теплий період року. У водоростевому ставку проходить очищення стоків за допомогою аерування їх мікродоростями, які утилізують біогенні елементи стоків, збагачують середовище киснем, підлужують його до рН 9–10, що сприяє інгібуванню сапрофітної і патогенної мікрофлори. В ньому, крім водоростей, активно розвивається біомаса непатогенних бактерій і найпростіших.

Із водоростевого ставка стоки, збагачені продуктами метаболізму бактерій, найпростіших, водоростей і їх біомасою, надходять у рачковий ставок. У ньому очищення відбувається за участю личинок різних комах, веслоногих і рачків. Із рачкового ставка очищені стоки надходять у рибоводний ставок, в якому біоценоз збагачується новими видами гідробіонтів – мальками риб (коропа), кормом для яких є біоценоз рачкового ставка. Тут відбувається остаточне очищення стічних вод.

Використовуються біологічні ставки як безпосередньо для очищення стічних вод без попередніх стадій, так і для доочищення стоків після очисних споруд у випадку, коли домішки, які залишаються, ускладнюють процес подальшої їх утилізації [5].

Поля зрошення і фільтрації — це спеціально відведені ділянки землі для очищення стічних вод. Вони відрізняються між собою тим, що поля фільтрації не використовуються для вирощування сільськогосподарських культур.

Процес самоочищення води відбувається за рахунок життєдіяльності різних груп ґрунтових організмів – бактерій, грибів, водоростей, найпростіших, черв'яків і членистоногих.

Лектор 1: Недоліки методу мінералізації органічних речовин у ґрунті та водоймищах:

1) економічний – вимагає великих капіталовкладень і витрат енергії на механічну очистку стічних вод. Вартість очисних споруд в середньому становить 20–25 % суми, витраченої на спорудження крупного свинарського комплексу;

2) мінералізація органічних сполук відбувається тільки в поверхневому шарі ґрунту, тому що кисень проникає у ґрунт тільки на глибину 20–30 см [1].

Лектор 2: Переваги - не вимагає механізації та обслуговуючого персоналу, простота оснащення, при внесенні до ґрунту не потребує ще будь-якої переробки крім відстоювання.

3.3 Включення гною до раціонів сільськогосподарських тварин

Лектор 2: До раціонів сільськогосподарських тварин додається переважно курячий послід. Гній попередньо висушується і обеззаражується, а за наявності підстилки – подрібнюється.

Лектор 1: Це вимагає певного обладнання і значних витрат енергії.

Крім того, до сьогодні нема одностайної оцінки якості продукції, одержаної на раціонах з добавками гною. Але передбачається, що при тривалому використанні гною як домішки до раціонів сільськогосподарських тварин у тваринницькій продукції збільшується вміст важких металів, антибіотиків та інших чужорідних речовин (ксенобіотиків).

Цей метод має і соціально-психологічну проблему, яка виникає при використанні продукції, одержаної з добавками гною.

Через це метод не має широкого розповсюдження і вимагає більш детального вивчення [2].

3.4 Вермікультивування

Лектор 2: Ефективним і екологічно безпечним методом утилізації різних відходів (тваринництва, рослинництва, побутових і промислових) є метод вермікультивування, тобто використання дощових черв'яків.

Метод вермікультивування дає можливість трансформувати різні відходи, які до цього були основними забруднювачами навколишнього середовища, з одного боку, в повноцінний білок тваринного походження, придатний для використання у годівлі тварин та харчуванні людей (черв'ячна біомаса), а з іншого боку — у зернисте гумусне добриво (біогумус) [7].

Серед усіх видів дощових черв'яків лише деякі можна розводити в штучних умовах. До них належать червоні черв'яки, зокрема червоний каліфорнійський гібрид, який у процесі селекції набув унікальну властивість — він не залишає своє місце перебування навіть за несприятливих умов. Це дає можливість розводити його в грядках просто неба, не побоюючись втрати популяції.

Промислове вирощування черв'яків можна проводити як просто неба, так і в закритих приміщеннях. Усі розрахунки, пов'язані з облаштуванням ділянок для вермікультування, заселенням та годівлею черв'яків, доглядом за ними й іншими операціями, виконуються з розрахунку на стандартну грядку, яка називається ложе. Ложе — це одиниця виміру, якою користувалися американські дослідники, з ділянкою площею 2 м² (2 x 1 м).

Щільність заселення одного ложа може коливатись від 30 до 100 тис. черв'яків (дорослих, молодих і коконів з яйцями). На 1 ложе потрібно 10–12 ц органічних відходів на рік. Із них 40 % використовується на задоволення життєвих потреб черв'яків, а 60 % виділяється у вигляді біогумусу. Одне ложе дає щорічно 4–6 ц біогумусу і близько 30–100 кг біомаси черв'яка.

За схемою ряд дослідників черв'яки утримуються на бетонаних майданчиках або в траншеях завширшки 2 м і глибиною 0,3–0,4 м. Довжина майданчика або траншей залежить від розмірів ділянки, відведеної під вермікультування.

Кормом для черв'яків є різні органічні відходи з високим вмістом целюлози, які пройшли процес ферментації. Основою раціону для черв'яків є гнойова біомаса, до якої додають певну кількість інших органічних відходів.

Для одержання якісного корму для черв'яків до вихідного органічного субстрату (відходів) існують вимоги: вологість 70–80 %, рН 6,8–7,2, вміст оксидів заліза не більше 10 %, відсутність твердих частин — металевих, дерев'яних, камінців тощо.

Гній коней є добрим кормом для черв'яків, оскільки містить значну кількість целюлози. Процеси ферментації у ньому тривають 5–6 міс.

Гній корів має високу лужність і після 6–8 міс. ферментації в суміші з 20–25 % подрібненої соломи є добрим кормом для черв'яків.

Гній свиней має високу кислотність і містить значну кількість протеїну. У зв'язку з цим до нього додають 30–40 % соло і ферментують 9–10 міс. Встановлено, що тверду фракцію гною свиней, видаленого гідрозмивом, можна додавати в корм черв'якам у свіжому вигляді без попередньої ферментації

Курачий послід належить до висококислотних субстратів, тому до нього потрібно додавати відходи рослинництва у співвідношенні 1:1 і ферментувати протягом 15–16 міс.

Після формування лож і закладки в них маточного поголів'я необхідно регулярно контролювати фізико-хімічні показники

(температуру, вологість, кислотність, тест 500ти черв'яків) корму і слідкувати за станом популяції черв'яків. Нову порцію корму після заселення маточного поголів'я рекомендується вносити тільки через 25–35 днів. Після цього черв'яків підгодовують регулярно і тільки після переробки попереднього корму.

Лектор 1: Недоліки методу: важкість контролю певних умов середовища, тривалість процесу ферментації.

Лектор 2: Переваги: метод вермікультування дає можливість трансформувати різні відходи, з одного боку, в повноцінний білок тваринного походження, придатний для використання у годівлі тварин та харчуванні людей (черв'ячна біомаса), а з іншого боку — у зернисте гумусне добриво (біогумус)

Білок черв'ячої біомаси має амінокислотний склад, аналогічний м'ясо-кістковому та рибному борошну, що дозволяє використовувати його як джерело повноцінного білка для збалансування раціонів сільськогосподарських тварин та у харчуванні людей.

Дощові черв'яки відіграють винятково важливу роль у формуванні ґрунту і створенні сприятливих умов для розвитку рослин. Вони проривають у ґрунті численні канали і ходи, які утворюють розгалужену дренажну і вентиляційну системи. Аерація і дренаж — важливі фактори родючості ґрунтів.ходами дощова вода швидко проникає у ґрунт разом з розчиненими в ній копролітами дощових черв'яків.

Лектор 1: Наведені традиційні методи не відповідають усім вимогам щодо утилізації і знезараження відходів, які забезпечували б санітарно-гігієнічне та екологічне благополуччя і були рентабельними з точки зору собівартості продукції. Витрати на переробку і знезараження тваринницьких відходів можуть в деяких випадках сягати до 40 % усіх витрат на одержання продукції тваринництва.

Методом, який відповідає цим вимогам, є анаеробне зброджування гнойової біомаси за допомогою анаеробних метаноутворюючих мікроорганізмів [1].

4. Нетрадиційні методи

4.1 Біотехнологія одержання біогазу шляхом анаеробного збродження відходів

Одним із найбільш перспективних методів утилізації відходів агропромислового комплексу (рослинництва, тваринництва) є їх біоконверсія в енергоносії біогаз шляхом мікробіологічної ферментації.

Біоконверсія – це трансформація речовин з однієї форми в іншу біологічними агентами (живими організмами або ферментами). За допомогою біоконверсії з відходів різного походження (рослинництва, тваринництва, побутових і промислових) можна одержати різноманітну продукцію – альтернативні носії енергії, високоякісне органічне добриво, білкові та вітамінні кормові добавки.

Біомаса (рослинна та гнойова) належить до поновлюваних джерел енергії. Біомаса – це органічна речовина, яка утворюється в процесі фотосинтезу, коли за допомогою хлорофілу рослинна клітина вловлює (фіксує) сонячну енергію з наступним перетворенням її в енергію хімічних зв'язків синтезованих органічних сполук. Рослинна біомаса Землі має енергетичний потенціал, який відповідає усім відомим запасам енергії корисних копалин.

Гнойова біомаса теж містить значну кількість енергії. Науковими дослідженнями було встановлено, що сільськогосподарські тварини використовують енергію, яка міститься в органічних речовинах рослинних кормів, з низьким коефіцієнтом. Так, в організмі тварин внаслідок складних багатоетапних біохімічних процесів енергія рослинних кормів трансформується у продукцію в середньому на 16,4 %; 25,6 % енергії витрачається на перетравлення та засвоєння кормів, а 58 % енергії переходить у гній.

Високий енергетичний потенціал гною дає можливість використовувати його як субстрат для інших організмів, які потім можна використати на корм тваринам, а також для одержання палива.

Метанове анаеробне зброджування є найбільш раціональним шляхом використання енергії відходів. Воно відбувається у спеціальних біогазових або біоенергетичних установках, у яких за рахунок анаеробної біоконверсії метаноутворюючими мікроорганізмами органічних речовин одержують енергоносії у вигляді біогазу, високоякісне знешкоджене органічне добриво і, навіть, кормові добавки.

Цей напрям біоконверсії в умовах поступового виснаження традиційних енергетичних ресурсів (нафти, газу, вугілля тощо) і особливо зростаючого дефіциту пального у сільській місцевості та ускладненням централізованого забезпечення її природним газом має важливе значення [3].

В умовах реформування аграрного сектора економіки України це дозволить на першому етапі зменшити споживання електроенергії для потреб фермерських господарств, а в подальшому, широко впроваджуючи мотор генератори на біогазі, повністю перейти на самозабезпечення господарств електроенергією.

Крім енергетичної і економічної проблеми, біотехнологія анаеробного зброджування дає можливість вирішувати екологічні та санітарно-гігієнічні проблеми. В результаті переробки гною шляхом анаеробного бродіння гине патогенна мікрофлора, яйця і личинки гельмінтів, насіння бур'янів, а також відбувається дезодорація гною.

Біотехнологія утилізації відходів з одержанням біогазу широко розповсюджена як у промислово розвинених країнах, так і країнах, що розвиваються. Нині більш ніж у 600ти країнах світу енергетичні та економічні проблеми вирішуються за допомогою біогазових установок. У багатьох державах тваринницькі ферми створюються паралельно з

установками метанового бродіння, тобто БГУ входять до складу тваринницького комплексу.

4.2 Біометаногенез та його етапи

Біометаногенез – це процес перетворення органічних сполук біомаси на біогаз за участю метаноутворюючих анаеробних мікроорганізмів. Коефіцієнт трансформації енергії біомаси в енергію метану при цьому процесі досягає 80 %. Це давно відомий процес, відкритий ще 1776 р. Вольтом, який встановив наявність метану в болотному газі.

Процес біометаногенезу проходить за участю метаноутворюючих мікроорганізмів, яких ідентифіковано від 30 до 50 видів. Це симбіотичне угруповання і завдяки тому, що воно може змінювати свої шляхи ферментації, функціонує як саморегулююча система, яка підтримує оптимальні значення рН, окислювально-відновний потенціал і термодинамічну рівновагу в реакторі.

Формування мікрофлори метантенка відбувається за рахунок мікроорганізмів, які потрапили в нього разом з субстратом (гноювою біомасою, стічними водами тощо). Загальна кількість бактерій в субстраті коливається від 1 до 15 мг/мл.

До складу природної популяції мікроорганізмів, які здійснюють процес метаногенезу, входять різні види анаеробів ті, що руйнують клітковину і зброджують прості вуглеводи, розщеплюючи білки, пептиди і амінокислоти, ліпіди, завдяки чому біомаса різного походження може бути вихідною сировиною для одержання біогазу [1,8].

Біометаногенез – це багатостадійний процес, у ході якого біополімери перетворюються на ацетат, форміат, метанол, метиламін, оксид і діоксид вуглецю, аміак, сірководень і водень. Він проходить у три послідовні етапи або стадії, і кожна з них здійснюється певною групою мікроорганізмів.

1й етап гідролізу. На цьому етапі беруть участь грамнегативні неспороутворюючі мікроорганізми, які володіють амілолітичною, целюлолітичною, протеолітичною, ліполітичною й іншими видами активності. За допомогою ферментів гідролаз, які синтезуються цими мікроорганізмами, відбувається розкладання біополімерних сполук (вуглеводів, білків, ліпідів, нуклеїнових кислот) до низькомолекулярних органічних речовин (моно- і олігоцукрів, амінокислот і пептидів, гліцерину і карбонових кислот, пуринових і піримідинових основ). Склад домінуючої на цьому етапі мікрофлори залежить від складу мікрофлори, яка є на субстраті, що надходить в метантенк, а також від хімічного складу субстрату.

На цій стадії утворюється також невелика кількість діоксиду вуглецю і водню.

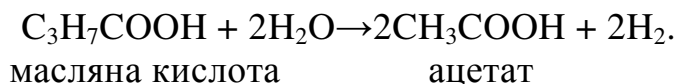
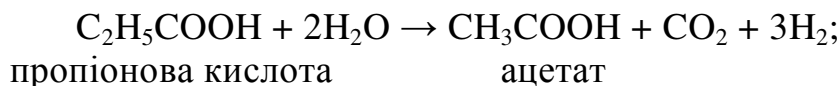
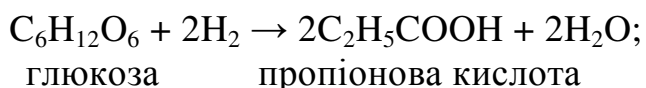
2й етап ацидогенезу. На ньому із одержаних на першому етапі низькомолекулярних органічних речовин за участю кислотоутворюючих

мікроорганізмів утворюються різні органічні кислоти (масляна, пропіонова) і їх солі. Потім вони окислюються до ацетату і діоксиду вуглецю. На цьому етапі також утворюються водень, аміак і сірководень.

Кислотоутворюючі бактерії є факультативними анаеробними гетеротрофами і найкраще функціонують в діапазоні рН від 4,0 до 6,5. Головним продуктом цього етапу є ацетат. Наприклад, із 1 моль субстрату (глюкози) утворюється 4 моль водню і 2 моль ацетату:



Конверсія низькомолекулярних органічних речовин відбувається таким чином:



На цьому етапі близько 76 % органічних речовин переходить в органічні кислоти (з них 52 % – в ацетат) і 24 % – у водень.

Власне метанове бродіння відбувається на третьому етапі.

Третій етап метаногенний. На цьому етапі за участю ферментів метаногенних споро- і неспороутворюючих мікроорганізмів проходить остаточне перетворення органічних речовин на метан і діоксид вуглецю. Також на третьому етапі з діоксиду вуглецю і водню теж утворюється метан. Так, з ацетату утворюється 72 % метану, а із H_2 і CO_2 – 28 % метану.

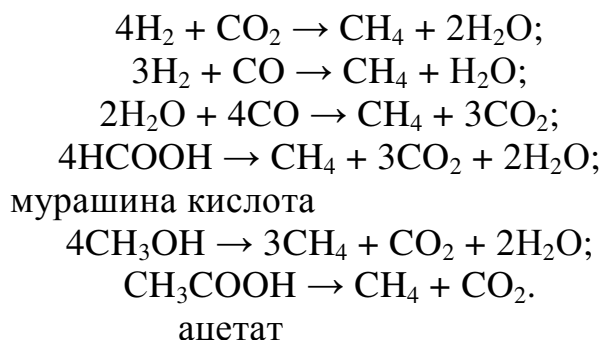
Метаногенні мікроорганізми цього етапу є облігатними (строгими) анаеробами. Вони проявляють найбільшу активність в більш вузькому діапазоні рН від 7,0 до 7,8. Метаногени належать до найдавніших живих істот – архібактерій. Вони відрізняються від інших прокариот тим, що у них маленький геном – близько 1/3 генома кишкової палички. За формою клітин метаногени є коками або паличками різних розмірів і рухливості, а деякі можуть утворювати навіть ниткоподібні клітини.

В основі життєдіяльності метаноутворюючих мікроорганізмів лежить здатність відновлювати діоксид вуглецю за такою реакцією:

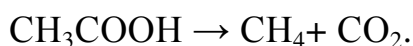


З біохімічної точки зору метанове бродіння є не що інше, як анаеробне дихання, в ході якого електрони з органічних речовин переносяться на діоксид вуглецю, що відновлюється до метану.

Метаногени синтезують метан за такими реакціями:



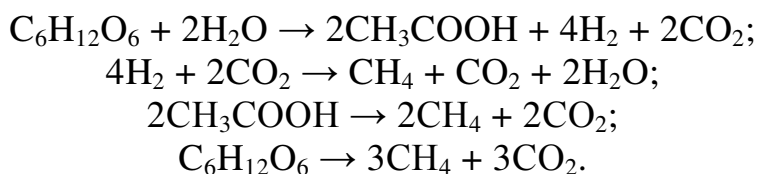
Основним субстратом для метаногенів є ацетат:



Деякі метаногени використовують як субстрат форміат, який трансформується ними в метан:



Суть процесу біометаногенезу можна виразити наступними реакціями:



Співвідношення проміжних і кінцевих продуктів у процесі метанового бродіння залежить від хімічного складу біомаси, умов ферментації і наявної мікрофлори.

Не вся органічна сировина потребує проходження трьох фаз ферментації. Багато відходів, наприклад екскременти тварин, містять велику кількість частково розщепленої речовини, що підлягає проходженню послідовних фаз процесу ферментації. Водночас деякі органічні сполуки (наприклад лігнін) і всі неорганічні складові не піддаються зброджуванню.

Реакції, що відбуваються при зброджуванні органічної речовини, мають екзотермічний характер. У процесі їх проходження виділяється приблизно 1,5 МДж теплоти на 1 кг сухої речовини біомаси, що зброджується, тобто 25 кДж/моль $\text{С}_6\text{Н}_{10}\text{O}_5$ (целюлози). Цієї теплової

енергії, як правило, недостатньо для підтримання відповідної температури біомаси, яку зброджують.

На практиці зброджування рідко доводять до кінця, бо це надто збільшує тривалість процесу. Зазвичай зброджують приблизно 60 % вихідного продукту [9].

4.3 Фактори, які впливають на біометаногенез і їх оптимізація

Кількість біогазу, яку можна отримати з різноманітних сільськогосподарських відходів, залежить від багатьох факторів: складу субстрату, умов проходження процесу анаеробного зброджування і особливо від тривалості знаходження субстрату в біореакторі та мікробіального складу в ньому.

У природних умовах швидкість метаногенезу під впливом асоціації анаеробних мікроорганізмів, які містяться в гнойовій або іншій біомасі, доволі низька. Факторами, які впливають на біометаногенез є температура, склад і рН середовища, достатня концентрація поживних речовин, відсутність або низька концентрація токсичних речовин тощо.

Для інтенсифікації процесу метанового зброджування ці фактори потрібно оптимізувати.

1. Склад середовища. Сприятливим для життєдіяльності метаноутворюючих мікроорганізмів є середовище, в якому концентрація сухої речовини знаходиться на рівні 8–12 %. Ця кількість сухої речовини забезпечує таку в'язкість субстрату, що дає змогу вільно переміщатися твердим частинкам субстрату і мікробним клітинам.

Більша концентрація твердих частин підвищує в'язкість субстрату, що погіршує інтенсивність перемішування і знижує вихід біогазу. Натомість при низькій концентрації органічної речовини і високій вологості (понад 97 %) зменшується вихід біогазу і збільшуються витрати енергії на підігрів біомаси.

Оптимізувати цей фактор можна шляхом контролю вмісту сухої речовини (8–12 %) і довжини частинок біомаси – не більше 30 мм.

2. Вміст поживних елементів (С і N). Біомаса метаноутворюючих мікроорганізмів має у своєму складі до 54 % вуглецю, 20 – кисню, 10 – водню, 12 – азоту, 2 – фосфору, 1 % сірки, а також деякі макро і мікроелементи (K, Na, Ca, Mg, Co, Mo, Ni). Тому для забезпечення росту мікроорганізмів і високої інтенсивності анаеробного зброджування біомаси необхідно, щоб у ній були в достатній кількості елементи, які сприяють росту бактерій. Найбільш важливими з них є вуглець та азот. Оптимальним співвідношенням цих елементів є 10–30 : 1 (С : N). Якщо це співвідношення завелике, тобто коли багато вуглецю, то в цьому випадку дефіцит азоту буде фактором, який обмежує процес бродіння. Якщо ж це співвідношення мале, тобто коли багато азоту, то утворюється велика кількість аміаку, що є токсичним для бактерій. Для підтримки співвідношення С : N в оптимальних межах у виробничих умовах гнойову

біомасу змішують з відходами, які містять або велику кількість азоту (курячий послід), або велику кількість вуглецю (подрібнена солома) [4,7].

3. Реакція поживного середовища. Суттєвий вплив на швидкість метаногенезу має реакція поживного середовища. У процесі метанового бродіння можна виділити кислу і лужну фази. Кисла фаза або воднева – це перший і другий етапи біометаногенезу, а лужна – це третя метанова фаза. Протягом першої фази значення рН знижується внаслідок утворення низькомолекулярних летких жирних кислот. В подальшому відбувається розщеплення метанотворюючими бактеріями летких кислот (33й етап) та нейтралізація кислих продуктів до слаболужної реакції (7,2–7,6).

Встановлено, що найбільш інтенсивне утворення метану проходить при значеннях рН, близьких до нейтральних або слаболужних. Метанотворюючі бактерії добре розвиваються і метаболізують субстрат у метан при рН 6–8, тоді як для кислотоутворюючих необхідно рН 4,0–6,5. Створення умов, які були б задовільними для кислотоутворюючих бактерій, забезпечується підтримкою рН 6,8–7,4, що й вважаються оптимальними. З точки зору забезпечення необхідного діапазону рН бажані системи з належною буферною ємністю для підтримки стабільності процесу зброджування. Поживне середовище в реакторі має буферні властивості завдяки таким реакціям:

1) утворення гідроксиду амонію з аміаку і води $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{OH}$, яка після нейтралізації кислих продуктів першої фази зумовлює характерне для метанового бродіння слаболужне середовище (рН 7,2–7,6). Ця природна буферна система виникає при високій концентрації в субстраті азотомістких поживних речовин і може використовуватися за умови, що концентрація вільного аміаку не досягає токсичних значень;

2) реакція утворення вуглекислого і двовуглекислого амонію з аміаку і вуглекислоти. При підвищенні активності кислотоутворюючих мікроорганізмів збільшується кількість кислот до такого рівня, коли буферна ємність втрачається на нейтралізацію кислих продуктів і рН зменшується нижче допустимих величин, у зв'язку з чим гальмується утворення метану [11].

За відсутності амонійного буферу підлужування може здійснюватися гідроксидами, карбонатами або гідрокарбонатами. В цьому випадку утворюється буферна система карбонат/гідрокарбонат.

Висока швидкість утворення біогазу досягається при концентрації у середовищі летких кислот у межах 50–500 мг/л.

При збільшенні їх концентрації вище наведеного рівня й одночасному зниженні рН можна підлужувати середовище хімічними речовинами (наприклад вапном). Кількість луку може сягати до 6000 мг/л. Бажано, щоб співвідношення ЛЖК до луку, наприклад до CaCO_3 , було 1 : 6.

Необхідно враховувати, що в консорціумі мікроорганізмів, які беруть участь в утворенні метану, кислотоутворюючі бактерії краще адаптовані

до зміни умов і мають вищу продуктивність порівняно з метановими бактеріями.

Метаногенні бактерії – найбільш примхлива з погляду культивування група серед симбіонтів, які беруть участь в анаеробному бродінні. Для росту вони потребують широкого спектра поживних речовин, включаючи вуглець, фосфор, азот, кальцій, сірку, магній, калій, амінокислоти, вітаміни та мікроелементи.

4. Концентрація в середовищі токсичних речовин. Швидкість розмноження метаноутворюючих мікроорганізмів залежить від концентрації у середовищі іонів важких металів, амонію, натрію, калію, кальцію, магнію, нітратів, сульфідів, а також різних ксенобіотиків, які при великих концентраціях можуть бути токсичними для мікроорганізмів.

Джерелом токсичних речовин можуть бути відходи тварин, які одержували великі дози антибіотиків або сполук металів (наприклад, Cu, Zn, Mn, Fe), що використовуються у тваринництві для балансування раціонів тварин за цими факторами живлення.

Для подолання токсичності можна використати такі прийоми: видалення токсичної рідкої фази, розчинення біомаси (водою, чистою біомасою) для зниження концентрації токсичних речовин, додавання антагоніста виявленого токсина, осадження токсичних речовин, адсорбція токсинів, наприклад, активованим вугіллям тощо, зв'язування токсинів у хелатний комплекс.

Це дає можливість знизити концентрацію токсичних речовин до рівня, який не буде перешкоджати бродінню. В іншому випадку біомаса не використовується для одержання біогазу.

5. Температурний режим. Температурний режим є одним із суттєвих параметрів, які впливають на метаболічну активність і швидкість розмноження метаноутворюючих мікроорганізмів та вихід біогазу.

У природі зустрічаються різні метаноутворюючі мікроорганізми, які відрізняються між собою за температурним оптимумом – психрофіли (0–20 °C), мезофіли (20–40 °C) і термофіли (40–60 °C), які виживають навіть при температурі 97 °C. Тому і метан у природі утворюється при широкому діапазоні температур – від 0 до 97°C. За даними Дубровіна В. та ін. (2004), метанова ферментація починається при температурі 6 °C. При нижчій температурі виділення метану припиняється.

Але оптимальними температурами, за яких життєдіяльність мікроорганізмів відбувається найбільш активно, є: для психрофітів – 6–20 °C, мезофілів – 32–33 °C, а для термофілів 52–54 °C.

Розрізняють три температурних режими одержання біогазу:

- 1) психрофільний – від 0 до 20 °C;
- 2) мезофільний – від 20 до 40 °C;
- 3) термофільний – від 40 до 60 °C.

Кожен температурний режим сприяє росту і підвищенню метаболічної активності певної групи метаногенів. Краще анаеробне зброджування біомаси проходить при температурі 30–40 °C і 50–60 °C (при

розвитку мезофільної і термофільної мікрофлори). Термофільні бактерії продуктивніші, ніж мезофільні.

При утилізації біомаси в термофільних умовах швидкість утворення біогазу у 2,5–3 рази вища, ніж при мезофільному режимі.

В установках, що працюють у мезофільному режимі, добовий вихід біогазу складає 1,0 м³, у термофільному режимі – 2,0 м³ біогазу з 1 м³ робочого об'єму метантенка.

Термофільні бактерії за час зброджування протягом 12–14 днів мінералізують стільки ж органічних речовин, скільки мезофільні бактерії за 21–36 днів. Завдяки цьому при однаковій кількості біомаси для зброджування місткість реактора буде меншою при термофільному режимі роботи БГУ порівняно з мезофільним. Але при мезофільному режимі досягається економія енергії, необхідної для підігрівання зброджуваної біомаси, і мікробна популяція, яка культивується при цьому режимі, менш чутлива до складу поживного середовища.

Проте є дані, що в біогазі, добутому за термофільних умов, зменшується частка метану.

Тривалість процесу ферментації біомаси при одержанні біогазу залежно від температурного режиму і конструкційних особливостей БГУ складає від 5 до 30–40 діб і більше. За мезофільних температурних умов процес зброджування найчастіше триває 24–28 діб, а при температурі в біореакторі 10 °С тривалість зброджування – до 4 місяців і більше.

Час зброджування також залежить від хімічного складу біомаси. Найтривалішим він буде при підвищеному вмісті целюлози та геміцелюлози, коротшим – у разі наявності білків і жирів, а найкоротшим – для цукрів.

6. Хімічний склад біомаси. Максимальний вихід біогазу на стадії найбільш інтенсивного метаногенезу залежить від хімічного складу біомаси, яка зброджується, що, в свою чергу, визначається видовим складом рослинних рештків та видом тварин і відповідно раціоном, який вони отримують [12, 13].

Лектор 2: Середня кількість біогазу, яку можна отримати з 1 м³ гною тварин оцінюється у 20–25 м³, хоча з техніко-екологічної точки зору рентабельною є кількість 30–35 м³.

Лектор 1: Технологія непрямой утилізації гною має суттєві переваги над технологією утилізації гнойової біомаси шляхом прямої анаеробної ферментації з одержанням біогазу. Технологія непрямой утилізації ефективніша за рахунок акумулювання сонячної енергії, яка накопичується у вигляді енергії хімічних зв'язків органічних сполук.

Використання біотехнології виробництва біомаси гідробіонтів – є перспективним для одержання біогазу. В Московському університеті була створена експериментальна бісолярна установка з виробництва біомаси мікроводоростей з подальшою утилізацією її у метан. Конструкція системи забезпечує рециркуляцію усіх біогенних елементів (рис. 4).

Фотосинтетичний блок бісолярної установки площею 30 м² забезпечує одержання біомаси хлорели, яка після концентрування і гомогенізації з метою руйнування клітинних структур подається у бродильну камеру, де проходить анаеробна ферментація біомаси й утворення біогазу, який складається зметану (80 %), діоксиду вуглецю (16 %) і водню (2 %). На частку інших домішок припадає близько 2 %. Конструкція бісолярної установки передбачає введення додаткових кількостей CO₂ повітря у фотосинтетичний блок [14].

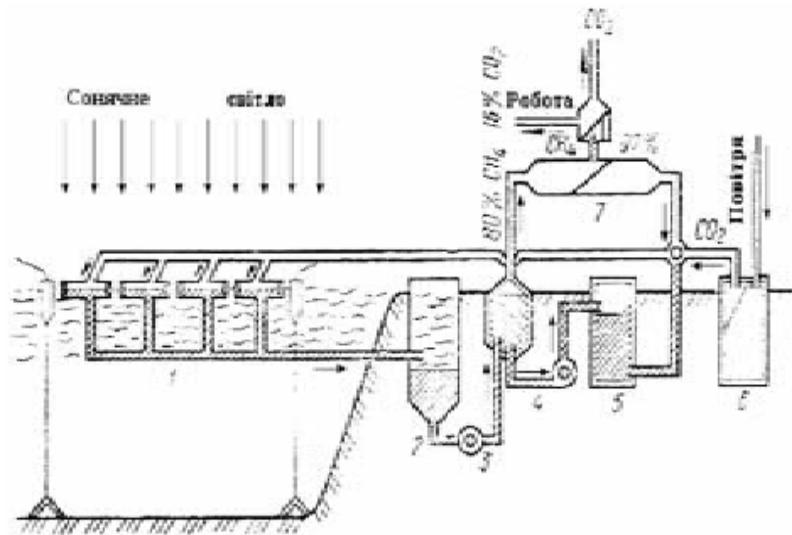


Рис. 4 – Бісолярна установка

1 – фотосинтетичний блок; 2 – відстійник; 3 – декомпресор; 4 – бродильна камера (метатенка); 5 – регенератор; 6 – концентратор CO₂; 7 - сепаратор

Вітчизняна БГУ «Кобос1» – це комплект обладнання для анаеробного зброджування гною з одержанням товарного біогазу і високопоживних органічних добрив. Він складається з реактора, підігрівача, витримувача, газгольдера, pomp, компресора і водогрійного котла (рис. 5).

Кобос1 розрахований для використання на фермах і комплексах великої рогатої худоби на 400 голів або 4000 голів свиней і має два реактори ємністю по 125 м³ кожен. Для комплексів на 600 і 800 голів кількість реакторів збільшується. Конструкцією БГУ передбачено двоступінчасте метанове бродіння. Гній з ферми надходить на подрібнювач, де руйнуються довговолоконні домішки (солома, гичка), а потім подається в першу камеру – підігрівач-витримувач ємністю 25 м³. Це циліндричний резервуар з теплообмінником, який є замкнутою системою за принципом «труба в трубі», де гній підігрівається до температури 40 °С. У цій камері проходить гідроліз високомолекулярних сполук до низькомолекулярних і утворення органічних кислот, діоксиду вуглецю, аміаку та ін. З підігрівача витримувача помпою дозатором гній періодично (4 рази на добу) подається в реактор, де проходить остаточне перетворення органічних речовин на біогаз.

Підтримування необхідної температури (+40 °С) на постійному рівні, компенсація теплових витрат в реакторах і камері забезпечується за допомогою теплообмінних пристроїв, через які подається гаряча вода (70 °С), яку одержують при спалюванні біогазу.

За основними якісними і кількісними показниками «Кобос1» не поступається зарубіжним аналогам, а за такими, як продуктивність за зброджуваною масою, виходом біогазу та тривалістю зброджування (5 діб) навіть має переваги.

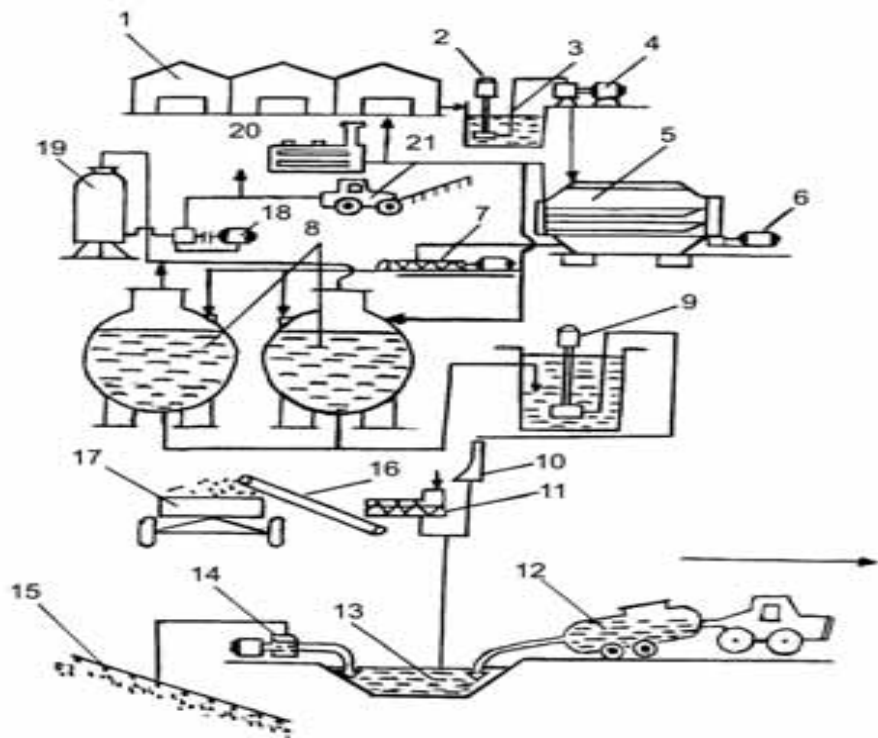


Рис. 5 - Технологічна схема комплексу обладнання «Кобос1»

1 — ферма; 2 — pompa для рідкого гною; 3 — колектор; 4 — подрібнювач; 5 — підігрівач витримувач; 6, 9 — гнойові помпи; 7 — гвинтова помпа; 8 — реактори; 10 — дугове сито; 11 — прессфільтр; 12 — цистерна-розкидувач; 13 — гноесховище; 14 — помпа; 15 — зрошувальна система; 16 — транспортер; 17 — візок; 18 — компресор; 19 — газгольдер; 20 — котел; 21 — трактор, який працює на біогазі.

4.4 Шляхи вдосконалення біогазового виробництва

1. Створення активних метаногенних штамів мікроорганізмів з використанням методів генетичної інженерії, тобто з використанням технологій рекомбінантних ДНК.

2. Використання збалансованої асоціації мікроорганізмів для скорочення часу виведення БГУ на робочий режим.

3. Введення в зброджувану біомасу органічних каталізаторів для інтенсифікації анаеробного бродіння – глюкози, целюлози, ацетату, метанолу.

4. Створення системи автоматичного управління БГУ і програм ЕОМ для оптимізації параметрів бродильного процесу.

5. Імобілізація метаногенів (мікроорганізм третього етапу) на носіях (щітках з капронових волокон, гранулах) з метою підвищення швидкості росту метаноутворюючих бактерій. Дослідженнями доведено, що на щітках уже через 2–3 тижні ферментації накопичується удвічі і трічі більше метаногенів, ніж у рідині.

6. Інтенсифікація метанового бродіння шляхом розділення процесу на дві стадії: першу – попередню, у якій в окремій ємності проводиться гідроліз субстрату до ацетату (тобто перші два етапи) і другу – власне метаногенез. Це дозволяє локалізувати специфічну для кожної стадії мікрофлору і забезпечити найбільш сприятливі умови для її розвитку [14].

4.5 Сучасний стан виробництва біогазу в Європі та світі

Загострення проблеми забруднення навколишнього середовища різноманітними органічними відходами, в тому числі відходами тваринницької галузі, а також зростаючий дефіцит енергетичних ресурсів є головними мотивами інтенсифікації Європейських розробок у галузі виробництва та ефективного використання біогазу. Підтримується інтерес до біогазових технологій також дієвим екологічним законодавством і державним датуванням впровадження нетрадиційних відновлювальних джерел енергії (особливо в Німеччині), а також введенням світових квот на забруднення довкілля [8].

У сучасній Європі найбільшого поширення набули три концепції виробництва біогазу:

- 1) виробниче біогазове обладнання при фермерських господарствах;
- 2) потужні лінії з переробки гною, розраховані на задоволення спільних потреб кількох господарств;
- 3) найпотужніші біогазові підприємства, що спеціалізуються на переробці органічних відходів різноманітного походження.

Обладнання для фермерських господарств розраховане на одержання біогазу з гною та на забезпечення потреб господарств в опаленні й електроенергії. Перероблений гній використовується як органічне добриво. Надлишок електроенергії може реалізуватися енергетичним компаніям і в такий спосіб приносити фермі додатковий прибуток. Як правило, таке обладнання складається з резервуарів для попереднього зберігання гною, анаеробних реакторів з системами керування й обігрівання, pomp для завантажування й розвантажування, резервуарів для зберігання відпрацьованого гною, системи для зберігання і транспортування газу, а також універсального модуля для опалення та вироблення електроенергії.

Фірма «У.Т.С. УмвелтТехнікСид ГмбХ» розробила також біогазову установку більшої продуктивності, яка експлуатується у м. Небелшітц (Німеччина). До складу установки входять гноезбірник, два ферментери, ємність для інших органічних відходів, відстійник зброженої біомаси, газгольдер і модульна теплоелектроустановка. Об'єм гноезбірника – 115 м³, ферментерів – по 883 м³ кожний, які виготовлені з бетону і мають

термоізоляцію. Біогаз акумулюється в газгольдері місткістю 300 м³, а звідти надходить до модульних теплоелектроустановок потужністю по 75 кВт. Продуктивність установки: 1100–1400 м³/добу біогазу, електроенергії – 2000–2500 кВт/год/добу, тепла – 3300–4200 кВт/год/добу. Вартість установки DM 625 на 1 м³ об'єму реактора [14].

Висновок

Лектор 2: Відходи сільського господарства негативно впливають на екологічний стан навколишнього середовища. Ще з моменту виникнення цивілізованого суспільства перед ним весь час стояла проблема утилізації шкідливих відходів. Через сільськогосподарську та іншу інтенсивну діяльність людини постійно відбувалися зміни фізичних, хімічних та біологічних властивостей навколишнього середовища.

Лектор 1: Але у наш прогресивний час сільськогосподарське виробництво свої відходи намагається максимально перетворити на доходи, що вирішує і екологічну і економічну проблеми. Біотехнологічні прийоми є прикладом ефективного контролю за станом навколишнього середовища.

Лектор 2: За допомогою сучасних підходів до вирішення проблеми утилізації відходів рослинництва та тваринництва – традиційного (аеробна очистка: вермікультивування, вивіз навозу на поля, мінералізація органічних речовин у ґрунті та водоймах та ін.) та нетрадиційного (анаеробна очистка – метанове зброджування, біоконверсія) гній, якого на долю відходів сільського господарства приходиться найбільше, використовують не тільки як добриво, але і як альтернативне джерело енергії.

Лектор 1: І хоча в кожного методу існують як свої переваги, так і недоліки, всі вони широко використовуються в наш час, а деякі постійно вдосконалюються і саме тому є перспективними.

Контрольні запитання

1. Які вам відомі види відходів сільського господарства? Чи залежить їх кількість від пори року?
2. Який вплив чинять відходи сільського господарства на навколишнє середовище? За рахунок чого?
3. Які ви знаєте традиційні методи утилізації сільськогосподарських відходів?
4. Чим цікавий метод утилізації гною вивозом його на поля або ж в якості органічного добрива? Які його особливості?
5. Що таке мінералізація ґрунту? Вкажіть переваги та недоліки методу.
6. Порівняйте принцип роботи аеротенка та біологічного фільтра. Застосування якого пристрою, на вашу думку, є більш економічно вигідним?

7. Що таке вермікультивування? Що лежить в основі цього методу?
8. Які нетрадиційні методи утилізації сільськогосподарських відходів вам відомі?
9. Що таке біометаногенез? Назвіть його етапи та наведіть відповідні рівняння реакцій.
10. Назвіть чинники та поясніть, як саме вони впливають на процес біометагенезу.
11. Поясніть принцип роботи біосолярної установки з застосуванням принципової схеми її роботи.
12. Для чого застосовують БГУ «Кобосс1»? Які її переваги та недоліки?
13. Які вам відомі шляхи вдосконалення біогазового виробництва?
14. Опишіть сучасний стан виробництва біогазу в Україні, Європі та світі.

Перелік посилань

1. Герасименко В.Г. Біотехнологія / В.Г. Герасименко, М.О. Герасименко, М.І. Цвіліховський. — К.: «ІНКОС», 2006. — 647 с.
2. Долгов В. Гигиена уборки и утилизации навоза / Владимир Долгов. — М.: Россельхозиздат, 1984. — 175 с.
3. Блюма Я.Б. Биотехнология в современном мире: польза и риски / Я.Б. Блюма // Цитология и генетика. — 2008.— № 1. — С. 59–80.
4. Ковалев Н.Г. Проектирование систем утилизации навоза на комплексах / Н. Г. Ковалев, И.К. Глазков. — М. : Агропромиздат, 1989. — 160 с.
5. Шагинурова Г.Э. Получение и культивирование гранул аэробных микроорганизмов в процессе очистки сточных вод. / Г.Э. Шагинурова, А.С. Сироткин, В.М. Емельянов // Биотехнология. — 2003. — № 3. — С. 80–89.
6. Гелетуха Г.Т. Впровадження біогазових установок у сільському господарстві України / Г.Т. Гелетуха, С.В. Кобзарь // Пропозиція. — 2001. — № 11. — С. 26–27.
7. Артамонов В. Биотехнология — агропромышленному комплексу / Виктор Артамонов. — М.: Наука, 1989. — 160 с.
8. Сидоренко О.Д. Биологические технологии утилизации отходов животноводства / О.Д. Сидоренко, Е.В. Черданцев. — М. : МСХА, 2001. — 241 с.
9. Коваленко Г.А. Роторно-инерционный биореактор для гетерогенных биокаталитических процесов / Г.А. Коваленко, С.В. Сухинин, А.В. Симаков // Биотехнология. — 2004. —№ 1. — С. 83–90.
10. Ясенецький В.М. Світові тенденції розвитку біогазових установок / В.М. Ясенецький, К.С. Клименко // Пропозиція. — 2007. — № 12. — С. 92–95.

11. Егоров Н. Биотехнология / Николай Егоров. — М.: Высш. шк., 1987. — 343 с.
12. Баева А. Биотехнология / Алла Баева. — М.: Наука, 1984. — 309 с.
13. Городний Н.М. Биоконверсия в управлении агроэкосистемами / Н.М. Городний, С.А.Тивончук, Э.С. Бэрри, А.В. Быкин. — К.: УкрИНТЭИ, 1996. — 185 с.
14. Бейли Дж. Основы биохимической инженерии / пер. с англ. : В. Берестов. — М.: Мир, 1989. — Ч. 1. — 692 с.