

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Навчально-науковий інститут хімічних технологій та інженерії

БІОКОНВЕРСІЯ ВІДХОДІВ

Навчальний посібник

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ Й НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Навчально-науковий інститут хімічних технологій та інженерії

БІОКОНВЕРСІЯ ВІДХОДІВ

Навчальний посібник

для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Затверджено
вченою радою
навчально-наукового інституту
хімічних технологій та інженерії
НТУ «ХП»,
протокол № 8 від 27.04.2023 р.

Харків
НТУ «ХП»
2023

УДК 606:502/504

Б 63

Рекомендовано до друку Вченою радою навчально-наукового інституту хімічних технологій та інженерії НТУ «ХП» (протокол № 8 від 27.04.2023 р.)

Рецензенти: **Мінухін В. В.**, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри мікробіології, вірусології та імунології ХНМУ
Осецький О. І., доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник лабораторії кріопротекторів Інституту проблем кріобіології та кріомедицини НАН України

Колектив авторів:

Белінська А. П., канд. техн. наук, доцент;
Близнюк О. М., докт. техн. наук, професор;
Масалітіна Н. Ю., канд. техн. наук, доцент;
Мироненко Л. С., канд. техн. наук

Б 63 Белінська А.П.

Біоконверсія відходів: навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / А. П. Белінська, О. М. Близнюк, Н. Ю. Масалітіна, Л. С. Мироненко – Харків: НТУ «ХП», 2023. – 198 с.

У навчальному посібнику викладено теоретичні основи біоконверсії відходів. Навчальний посібник призначений для студентів усіх форм навчання спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія».

Розглянуто загальну характеристику відходів, основні принципи мікробіологічної переробки органічних відходів. Зосереджено увагу на способах збагачення відходів кормовим білком, силосування, компостування, аеробної стабілізації, анаеробному зброджуванні та метаногенерації, біоконверсії в теплову енергію, паливо, біодобрива, а також біодеструкції рослинних і синтетичних полімерів. Проаналізовано основні технологічні особливості складування та поховання твердих відходів. Розглянуто питання вермикультивування та вермикомпостування як способи біоконверсії відходів.

Посібник може бути корисним науковцям і практикам, викладачам, а також працівникам біотехнологічної та переробної промисловості і сільського господарства у їх повсякденній професійній діяльності.

УДК 606:502/504

© Белінська А. П. Близнюк О. М., Масалітіна Н. Ю.,
Мироненко Л. С. 2022

ВСТУП

Розвиток людського суспільства та задоволення його потреб відбувається під час постійного вилучення та подальшого використання природних ресурсів. Результатом цього є значне утворення та накопичення органічних відходів. Поводження з органічними відходами є однією з найболючіших проблем сьогодення і посідає пріоритетні позиції в усіх розвинених країнах. В Україні в результаті утворення великої кількості органічних відходів, ця проблема набула особливої гостроти.

Організація об'єднаних націй надає таке визначення терміна «поводження з відходами»: це діяльність та дії, необхідні для управління відходами від їх створення до остаточного знешкодження. Це включає збирання, транспортування, оброблення та утилізацію відходів, а також моніторинг та регулювання процесу поведження з відходами.

Щорічно в Україні накопичуються мільйони тонн відходів різних галузей промисловості. Наприклад, при переробці 4,0 млн. тонн насіння соняшника утворюється до 1 млн. тонн лушпиння. В даний час близько 10 % лушпиння використовується для виробництва кормових дріжджів, на деяких підприємствах вона спалюється в котлах. У зв'язку з низькою рентабельністю та екологічною небезпекою діяльність більшості гідролізно-дріжджових підприємств припинена, і дріжджі для кормових цілей не виробляються. На підприємствах України (цукрових заводах, зернопереробних підприємствах, заводах з виробництва плодоовочевих соків, пива, вина та ін.) щорічно накопичуються сотні тисяч тонн відходів, які протягом доби піддаються мікробіологічному псуванню і практично ніде не використовуються.

Приблизно 1–7 % цих відходів підсушують і застосовують для отримання поживних середовищ у мікробіологічній промисловості і як кормові добавки в раціоні сільськогосподарських тварин. Решта маси, як правило, скидається в каналізацію і спрямовується на споруди біохімічної очистки. На превеликий жаль на сьогодні найпоширенішим способом поведження з органічними відходами в Україні є розміщення їх у відвали, сміттєсховища, звалища та інші накопичувачі. Вони займають мільйони гектар родючих земель, є джерелом забруднення повітря, фільтрат із них проникає в ґрунти, підземні води. Але ж відходи можуть стати джерелом вторинних ресурсів, джерелом утримування енергоносіїв. Тому перед людством стоїть задача якомога ширше впроваджувати передові екобіотехнології щодо запобігання та обмеження утворення відходів, утилізації, регенерації їх, знешкодження відходів, які не

підлягають утилізації.

Біоконверсія відходів різного походження, зокрема органічних, також сприяє скороченню викидів парникових газів в атмосферу, а отримані продукти переробки можуть бути використані як високоякісні добрива. Увагу різних наукових груп спрямовано у бік розвитку та впровадження нових способів утилізації відходів, серед яких анаеробна біотехнологічна конверсія біомаси з супутнім синтезом біометану розглядається як актуальне рішення утилізації великих мас даних відходів. Однак, незважаючи на наявні переваги анаеробної конверсії відходів з отриманням біоенергії, найчастіше низька стабільність роботи анаеробних реакторів все ще перешкоджає комерційному впровадженню багатьох розроблених способів.

Одним із перспективних напрямів оздоровлення навколишнього середовища є екологічна біотехнологія, заснована на використанні живих організмів: бактерій, нижчих грибів, рослин, вермикультури (дощових хробаків). Особливістю біооб'єктів є їх висока продуктивність, специфічність діяльності, можливість адаптації до відходів різного складу, що переробляються, порівняно низька вартість робіт.

Навчальний посібник підготовано, спираючись на Закон України «Про відходи» [1] та Класифікатор відходів [2], на основі конспектів лекцій та навчальних посібників [3–8] та адаптованих робіт [9–54], що послужили також джерелом ілюстрацій та схем, так, щоби максимально полегшити засвоєння хімічних особливостей складу відходів, стадій розвитку мікробних комплексів, стадій біоконверсії відходів, технологічних схем установок, схем техніко-хімічного контролю типових біотехнологічних виробництв з переробки відходів. Навчальний посібник рекомендовано застосовувати під час вивчення курсів «Біоконверсія відходів», «Екобіотехнологія» та «Агробіотехнологія» студентам спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» всіх форм і рівнів підготовки.

ГЛАВА 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ

За оцінками дослідників, в біосферу щорічно надходить близько 20–30 млрд. т твердих відходів, з них 50–60 % – органічні сполуки. Небезпечні відходи становлять 10–15 %. Відходи займають величезні земельні площі, з метою їх транспортування і складування витрачаються значні матеріальні кошти. Крім того, з ними губляться цінні компоненти, які могли б бути залучені до господарської та виробничої діяльності.

Відходи можна поділити на дві групи. Першу групу складають відходи, шкідлива дія яких на навколишнє середовище нейтралізується ліквідаційними методами: розкладанням, складуванням, похованням та іншими. До другої групи входять відходи, які підлягають утилізації як вторинні матеріальні ресурси. Їх повертають на переробку ті підприємства, де вони утворюються, чи направляють до інших галузей народного господарства.

За класом небезпеки відходи поділяються на надзвичайно небезпечні (I клас), високонебезпечні (II клас), помірно небезпечні (III клас), малонебезпечні (IV клас).

У промислово розвинених країнах на рік накопичується до 5 т (за сухою масою) відходів для людини. Частка відходів, що переробляються на корисні продукти (утилізуються, рециркулюються), у загальній масі становить 10–20 %. У багатьох із цих країн відповідно до природоохоронного законодавства відходи, що містять понад 5–10 % органічної речовини, не повинні складуватися, а мають перероблятися.

Питомі показники утворення відходів за даними Мінжитлокомунгоспу України в середньому становлять 250 кг/рік на душу населення, а у великих містах досягають 330–380 кг/рік і мають тенденцію до зростання. Здебільшого відходи вивозять на звалища або спалюють. Частка ж відходів, що рециркулюються або біологічно переробляються, є вкрай незначною.

Україна посідає дев'яте місце серед країн з найбільшим обсягом виробленого сміття на одного жителя, повідомляє *USA Today*, посилаючись на низку досліджень. Так, агентство *24/7 Tempo* здійснило розрахунки на основі даних Світового банку за 2018 рік.

Всього на ринку збирання і заготівлі відходів як вторинної сировини в Україні працює близько 1500 підприємств. Основною їх діяльністю є збір і заготівля відходів як вторинної сировини (макулатура, текстильні і полімерні матеріали, склобій, зношені шини, відпрацьовані акумулятори та ін.). Зібрані відходи використовуються перерабними підприємствами для виготовлення

картону, офрокартону, туалетного паперу, нетканих матеріалів, поліетиленових труб, тари й упаковки та іншої продукції.

Екобіотехнологічні методи переробляють відходи обох груп, і в першу чергу природні органічні речовини, які служать сировиною для отримання різних продуктів мікробіологічного синтезу.

Для біологічної переробки придатні такі відходи.

1.1 Відходи деревооброблюваної промисловості

Деревина хвойних та листяних порід та її компоненти: целюлоза та геміцелюлоза, лігнін, кора. Деревина становить основну частку загальної первинної продукції органічної речовини. З приблизно 200 млрд т (за сухою речовиною) річного приросту біомаси на Земній кулі близько 120 млрд т припадає на деревину.

Щорічно у світі заготовляється близько 2 млрд т деревини, з яких 45 % витрачається на паливо, 40 % – на виробництво пиломатеріалів, 15 % переробляється в хімічній та біотехнологічній промисловості (в основному у вигляді відходів деревообробної та целюлозно-паперової промисловості).

До складу деревини входять полісахариди (целюлоза, геміцелюлоза) та лігнін. Склад полісахаридів деревини наведено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Склад полісахаридів деревини

У деревині хвойних порід міститься приблизно 60 %, у деревині листяних порід – приблизно 45 % гексоз. Головною складовою частиною деревини є

целюлоза – високоупорядкований полімер, що складається з залишків *D*-глюкози в піранозній формі, з'єднаних глікозидним зв'язком, зі ступенем полімеризації близько 14000. Основна структурна одиниця целюлози – дисахарид целобіоза. Молекули целюлози утворюють фібрили, які складаються з 40–60 молекул, з'єднані водневими зв'язками. На целюлозу припадає 40 % від загальної маси деревини. У природних умовах целюлоза розкладається різними целлюлолітичними мікроорганізмами.

Поряд з целюлозою найбільш важливий компонент деревини *лігнін* – один з найбільш складних гетерогенних полімерів із тривимірною структурою, що складається в основному з фенілпропанових ланок та метоксильних груп. Молекулярна маса його коливається від 1000 до 10 000. У лігніні міститься 58–70 % вуглецю, 5–7 % водню та 24–30 % кисню. Фенілпропанові ланки з'єднані надзвичайно стійкими до дії ферментів зв'язками: карбон-карбоновими С–С та етерними С–О–С. За структурою лігнін відноситься до поліфенолів і є подібним до гумінових кислот. У природних умовах лігнін структурно пов'язаний з полісахаридами, інкрустує целюлозу рослинних волокон. Лігнін є основним компонентом, що визначає властивості лігноцелюлозних матеріалів. Він є одним з найбільш стійких органічних полімерів у природі, повільно піддається біологічному руйнуванню і погіршує перетравлюваність целюлози та геміцелюлози жуйними тваринами. Лігнін розкладають мікроорганізми, що належать до лігнолітичної групи.

Геміцелюлоза – гетерополісахарид, що містить C_5 -цукри (арабінозу, ксилозу, рибозу) та C_6 -цукри (глюкозу, галактозу, маннозу). Ступінь полімеризації у геміцелюлоз не перевищує 150. У природних умовах вона окислюється активніше, ніж целюлоза. Геміцелюлозу здатні розщеплювати багато бактерій і грибів. Вона розщеплюється в аеротенках під час очищення стічних вод целлюлозно-паперових комбінатів.

До геміцелюлоз відносять *ксилан* – опорну речовину в соломі, деревній рослинності, за поширеністю в природі займає третє місце після целюлози та лігніну. Молекула його складається з залишків *D*-ксилози, з'єднаних 1,4-глікозидними зв'язками, та арабінози. У ксилані містяться також глюкоза, манноза, галактоза та глюкуронова кислота. З ксилану під дією ферменту ксиланази утворюється ксилоза, ксилобіоза і коротколанцюгові фрагменти молекули ксилану.

З тканин деревини найбільш стійкою до біодеградації є *кора*. Стійкість кори до біологічного впливу обумовлена високим вмістом фенольних речовин, особливо *танінів*, що є інгібіторами росту та ферментативної активності

більшості мікроорганізмів, а також воскоподібною речовиною – *суберином*, що перешкоджає доступу в клітковину вологи, повітря та контакту з мікроорганізмами. Розкладання кори починається тільки після руйнування просочених суберином клітинних оболонок. У біореакторах кора може бути зруйнована змішаними культурами мікроорганізмів, що продукують фермент таназу, яка впливає на дубильну кислоту, що міститься в корі.

Відходи, що утворюються при заготівлі деревини на лісосічних ділянках (гілки, кора, суки, верхівки інших дерев), важко збирати та вивозити, тому в вони піддаються переробці далеко не в повній мірі. Такі відходи є доцільним використовувати на виробництвах з переробки деревини.

Відходи целюлозно-паперової промисловості: передгідролізати та сульфітний луг. Передгідролізати утворюються під час первинної обробки деревної тріски гарячою водою для видалення геміцелюлози. При цьому зв'язана оцтова кислота, що міститься в деревині, переходить у водний розчин, створюючи в ньому слабокислу реакцію (рН 4,5), що сприяє частковому гідролізу геміцелюлози і накопиченню у водному розчині продуктів її деполімеризації.

З 1 т деревини, що переробляється, утворюється до 6 м³ передгідролізітів. Сульфітний луг утворюється в об'ємі 6,5–8 м³/т отриманої целюлози, коли деревину обробляють при підвищеній температурі варильним розчином, що є сумішшю сірчистої кислоти з водними розчинами бісульфітів і моноссульфітів – H₂SO₃, CaSO₃, Ca(HSO₃)₂, Mg(HSO₃)₂, NH₄HSO₃ та NaHSO₃. При цьому целюлоза вилучається в неушкодженому вигляді, і гідролізується лише геміцелюлоза (з утворенням гексоз та пентоз). Лігнін утворює із сірчистою кислотою водорозчинні лігносульфоокислоти (лігносульфонати). При моноссульфітному варінні (рН 6,0–7,0) вносять CaSO₃, при бісульфітному (рН 4,0–4,2) – Ca(HSO₃)₂, при кислому бісульфітному варінню (рН 1,0–1,5) вноситься Ca(HSO₃)₂ + SO₂. В результаті отримують целюлозу та сульфітний луг. Концентрація цукрів у сульфітному лузі досягає 3,0–3,5 %, з них 62–68 % – зброджуються. Сульфітний луг бісульфітного та кислого бісульфітного варіння використовують для отримання кормових дріжджів. Лігносульфонати дріжджами не споживаються та залишаються у вигляді твердих відходів (сульфатний лігнін, крафт-лігнін). Кількість їх може досягати 50 % від маси переробленої деревини.

Технічний лігнін. Утворюється при хімічній переробці деревини на гідролізно-дріжджових підприємствах. При обробці подрібненої рослинної сировини хімічним перколяційним гідролізом розведеною сірчаною кислотою

при підвищеному тиску і температурі на виході з гідролізного апарату відбирають гідролізати деревини. З цукру отриманих гідролізатів деревини при анаеробному зброджуванні гексоз отримують етанол, з гексоз і пентоз або з пентоз після зброджування гексоз і відгону етанолу – кормові дріжджі. Після гідролізу залишається відход – технічний (гідролізний) лігнін.

Присутність у гідролізному лігніні сірчаної кислоти обмежує можливість його утилізації. Частина технічного лігніну використовують як паливо, добавок до цементу і наповнювачів для пластмас, стабілізаторів ґрунту на дорогах, для отримання сорбентів і т. п. У сільському господарстві можливе використання лігніну в натуральному вигляді і як складової частини компостів, як структуратор ґрунту та органо-мінерального добрива. Компостування лігніну спільно з послідом, активним мулом і осадами з очисних споруд, корою дозволяє отримувати добрива з високими поживними характеристиками. Утилізація гідролізного лігніну методом компостування є більш ефективною, ніж його використання в чистому вигляді.

1.2 Відходи сільського господарства

Сільськогосподарське виробництво ділиться на 3 типи джерел утворення відходів виробництва, а саме вирощування, тваринництво та аквакультуру. Сільськогосподарські відходи можуть мати вигляд рідини, субстензії та перебувати в твердому стані. Їх поділ може залежати від сирової сільгосппродукції, яка була вирощена та залишила невикористані відходи після вирощування фруктів, м'яса, риби, птиці, молочної продукції та культур. Отже, відходи виробництва сільського господарства складаються з відходів *тваринного походження* (гній, туші тварин), відходів *харчової переробки*, *сільськогосподарських відходів* (залишки від круп, очерет, фрукти, овочі, обрізки) та *токсичних* сільськогосподарських відходів (пестициди, інсектициди та гербіциди). Більшість пестицидів досить просто може потрапити у підземні водойми та забруднити спільні запаси води. Процес утворення відходів прямо залежить від виду сільського господарства, загалом можна відокремити вирощування рослин, розведення тварин та морських жителів. В кожному з цих видів сільського господарства утворюються різні відходи залежності від їх типу. Більшість відходів сільського виробництва вважається небажаними або такими, які економічно ефективно переробляти.

Розглядаючи окремо види відходів сільського виробництва залежно від типу підприємства, можемо зазначити, що в кожного з них є свої особливості.

Виокремлюючи відходи від вирощування рослин, можемо сказати, що головною проблемою для їх переробки є *добрива*. З одного боку, вони насичують аномальною кількістю мінеральних добрив рослини, через що останні ростуть швидше, ніж в натуральних умовах. З іншого боку, добрива досить тяжко переробляються, а також легко поширюються, через що мають згубний вплив на природу. Таким чином, завелике збагачення землі вуглецем, фосфором та озоном приводить до евтрофікації водойм. Евтрофікацію легко помітити, коли водойми зеленіють та мутніють через ріст мікроорганізмів у воді. Загалом таке явище має назву шкідливого цвітіння водоростей (*harmful algal blooms, HABs*). Надмірний розвиток мікроорганізмів приводить до мертвих водних зон, що погано впливає на водну екологічну систему. Загалом відходи від вирощування рослин можна поділити на відходи від живих та неживих мікроорганізмів. Відходи від вирощування мають такі види, як лісові відходи, аграрні відходи, енергетичні культури та тверді побутові відходи.

У класифікаторі відходів до відходів від *вирощування рослин* можна віднести відходи від виробництва зернових культур, відходи від комбінованого господарювання, відходи від надання послуг вирощування рослин. Солома, кукурудзяні качани, рисове лушпиння, соняшникове лушпиння і т.п. мають низький вміст лігніну; частка целюлози чи інших полісахаридів сягає 90 %. У зв'язку з низькою насипною щільністю ці відходи не вигідно транспортувати, тому їх доцільно переробляють поблизу сировинних джерел. Під час переробки цих відходів за допомогою ферментів, ферментних композицій та мікроорганізмів одержують продукти з покращеною кормовою цінністю. Крім того, зелена маса рослин є цінною сировиною для одержання кормів силосуванням, а також рослинного та мікробного кормового білка.

Відходи від сільськогосподарської *тваринницької* діяльності включають такі типи відходів, як *тверді* відходи (кістки, гній, підстилка великої рогатої худоби та свиней), стічні води (сеча, брудна вода), забруднення повітря. Згідно з даними звіту Національної Академії Наук Ізраїлю виведено, що 60 % усіх біомасних відходів у світі утворюються від ведення тваринництва, 36 % – від людей, а 4 % – від диких тварин. Також тваринництво посідає провідне місце з виробництв по забрудненню екологічного середовища викидами в повітря (14,5 %). Загалом виробництво яловичини викидає 301,4 г CO₂ на 100 г продукту. Отже, забруднення, спричинене виробництвом продукції тваринного походження, є серйозною проблемою, оскільки їх більшість будується навколо житлової зони. Забруднення повітря також включає запахи, утворені від життєдіяльності бактерій. Останнім підвидом відходів виробництва продукції

сільського господарства є вирощування морських продуктів. Це виробництво залишає здебільшого відходи водного та болотяного видів. Загалом ці відходи є найтяжчими для збирання й переробки, оскільки саме вони більше всього забруднюють воду під час самого процесу виробництва. Зі зростанням використання кормів збільшилась кількість відходів аквакультур, 30 % яких займають тверді побутові відходи.

Щорічно в тваринницьких і птахівницьких господарствах України утворюється 200–250 млн т гною і 20–25 млн т посліду, а сукупні обсяги рідких стоків досягають 700–800 млн т. З однієї голови великої рогатої худоби утворюється 45 кг/добу–4,5 кг/добу, птиці – 0,1 кг/добу (табл. 1.1). За рік на птахофабриці продуктивністю 10 млн/рік бройлерів утворюється 15–20 тис. т підстилки та посліду.

Таблиця 1.1. Кількість гною, що утворюється, і посліду (у перерахунку на 1 голову тварини)

Параметри	Птахи	Свині	Велика рогата худоба
Кількість, кг/добу	0,1	4,5	45
Вміст, % від живої ваги	5–6	8–9	9–11
Вміст сухої речовини, %	20–30	15–20	10–11
Середня суха вага, кг/дїб	0,03	0,7	4,5

Гній та послід як добрива містять багато поживних речовин (табл. 1.2). Однак гній має високу вологість, неприємний запах, містить умовнопатогенну та патогенну мікрофлору, насіння бур'янів, тому рідкий гній, особливо свинячий, перед вивозом на поля необхідно витримати 6–8 місяців для його знешкодження. У ґрунті гній розкладається повільно.

Таблиця 1.2. Вміст поживних речовин у гною

Тварини	Вміст СР, %	Вміст різних елементів, кг/т свіжого гною			
		N	P	K	Mg
Велика рогата худоба	4–23	2,4–6,5	0,4–1,8	2,0–5,8	0,2–0,6
Свині	5–25	6,0–6,8	0,6–2,1	1,7–3,6	0,3–0,7
Птахи	23–68	9,6–23	2,4–12	3,8–11,6	1,2–2,2

Надмірна кількість заораного в ґрунт гною порушує структуру ґрунтового співтовариства і пригнічує активність типової ґрунтової мікрофлори, тому для нешкідливої для ґрунту утилізації гною необхідні великі земельні площі. Використання гною утруднено також у зв'язку з неможливістю вивезення на поля для застосування як органічного добрива в зимову пору року, і через підвищені транспортні витрати на перевезення. Для підтримки бездефіцитного

балансу гумусу у ґрунті потрібно вносити на поля щорічно понад 15 т гною на 1 га, при цьому приріст урожайності сільськогосподарських культур спостерігається невисокий і часто не окупає витрати на внесення сирого гною.

Пташиний послід у вихідному вигляді також містить велику кількість патогенної для людей і тварин мікрофлори, а також насіння бур'янів. Біогенні мінеральні елементи (азот, фосфор, калій) – знаходяться в посліді в рухомій формі і легко вимиваються з ґрунту. Пташиний послід важко розподіляти рівномірно по поверхні ґрунту, що створює вогнища з високою концентрацією поживних елементів, що призводять до загибелі рослин в результаті хімічного опіку кореневої системи. Так само як і для гною, перевезення послідних добрив на поля під сільськогосподарські культури на відстань понад 10–15 км не окупається збільшенням урожаю.

Зважаючи на недосконалість технологій, особливо при безпідстилковому способі утримання тварин, частина гною та посліду розбавляється в 12–14 разів водою, що значно ускладнює та збільшує вартість обробки та транспортування цих відходів, вимагає додаткових ємностей, сховищ, очисних споруд для збирання та переробки. В результаті гній та послід на фермах накопичуються, займають великі площі, забруднюють ґрунтові води та атмосферу. Невикористаний гній скидають у яри, відвали, спускають у водоймища, захоронюють.

Для переробки відходів тваринництва найчастіше використовують низькотемпературне або високотемпературне сушіння та біотехнологічні методи або їх поєднання. При низькотемпературному сушінні отримують лише зневоднений, але не знезаражений продукт. У ньому зберігаються деякі патогенні мікроорганізми і життєздатне насіння бур'янів. Такий продукт небажано використовувати на полях як добрива. Крім того, установки для низькотемпературного сушіння є складними у виготовленні, мають високу вартість та є неекономічними в експлуатації. Недоліком високотемпературного сушіння є підвищені витрати теплоносія на випаровування вологи, значна втрата поживних речовин (до 40–50 %) під впливом високих температур, забруднення навколишнього середовища внаслідок викиду в атмосферу шкідливих сполук. Є дані, що термічно висушений сухий пташиний послід може містити канцерогенні речовини. Враховуючи, що ринкова ціна продуктів із перероблених відходів є низькою, використання сушіння – найчастіше нерентабельний метод. Економічно та екологічно ефективнішим є використання біотехнологічних методів.

Способи біотехнологічної переробки відходів тваринництва в корисні

продукти включають отримання органомінеральних добрив, компостів, кормових добавок, біогазу. Найбільш широко застосовують анаеробне зброджування гною для отримання біогазу. Отриманий біогаз можна використовувати для опалення приміщень для утримання тварин, житлових будинків, теплиць, приготування їжі, сушіння гарячим повітрям, підігріву води, вироблення електроенергії за допомогою газових генераторів. Одночасно з біогазом одержують більш цінне органомінеральне добриво. Зброджений гній зберігає основні гумусоутворюючі речовини. Мінеральні речовини, що містяться в ньому, краще засвоюються рослинами, і тому він є ефективнішим як добриво. Перероблений шляхом метанового бродіння гній підвищує врожайність на 10–15 % порівняно з непереробленим гноем.

Аеробні методи ферментації, компостування, вермикомпостування з внесенням додатково органічних субстратів (соломи, торфу тощо) і культур мікроорганізмів, а також промислових ліній дощових черв'яків дозволяють отримувати з гною і посліду ще більш ефективні органомінеральні добрива та кормові добавки.

1.3 Відходи переробної промисловості

Ефективне розділення промислових відходів є ключем для подальшого їх використання як вторинного ресурсу або проведення їх послідувочої утилізації/переробки, видалення шляхом застосування відповідних технологій.

Відходи *цукрової промисловості* – меляса, буряковий жом, фільтраційний осад (дефекат), рафінадна патока, буряковий «бій» та хвостики буряків.

Меляса містить 70–75 % сухих речовин та до 50 % сахарози. У ній міститься близько 2 % азотистих речовин, 6 % золи, амінокислоти (у найбільшій кількості аспарагінова і глутамінова), бетаїн (азотиста основа, утворюється при декарбоксілюванні амінокислот), аміни та аміді, вітаміни. Мелясу широко використовують для отримання різних продуктів мікробіологічного синтезу.

Жом містить 6,0–7,5 % сухих речовин, у тому числі 0,2–0,4 % цукру. Жом може бути перероблений силосуванням (за умови внесення молочнокислих заквасок або молочної сироватки).

Відходи від *переробки злакових і круп'яного виробництва* – солома, фуражне зерно, висівки, лушпиння та ін. Зерновідходи пшениці, жита та інших харчових культур, що мають високу поживною цінністю, йдуть на корм худобі. У висівках та кормовому борошні міститься велика кількість крохмалю,

вітамін групи *B, D, E*. У лушпинні знаходиться крохмаль, тому корми на його основі використовують переважно для жуйних тварин. Крім того, зерновідходи технічних культур мають задовільну теплопровідну здатність і можуть використовуватися як економічно вигідне паливо.

При великому накопиченні непридатної для подальшого використання сировини проводиться утилізація зернових відходів. Обов'язковій утилізації належать зернові культури, що втратили свої властивості під впливом кліматичних умов або в результаті неправильного тривалого зберігання; що заражені грибковою чи бактеріальною інфекцією; продукція з терміном придатності, що минув.

Неправильне перероблення зернових відходів може призвести до серйозних екологічних проблем. До того ж, при утилізації є ризик вибуху пилу. Тому така відповідальна процедура має проводитись на оснащених спеціальним обладнанням підприємствах з дотриманням усіх правил пожежобезпеки. Поховані у ґрунті відходи зернових культур можуть стати осередком патогенної грибкової інфекції, сприяти розмноженню гризунів, порушувати екосистему району.

Відходи *крохмало-патокової промисловості* – картопляна мезга та клітинний сік, утворені під час виробництва крохмалю з картоплі, кукурудзяний екстракт та мезга кукурудзяно-крамального виробництва, фільтраційний осад патокового та глюкозного виробництва, мальтозна макуха, гідрол (містить продукти реверсії та розкладання глюкози, солі та інші домішки, що містяться в крохмальних гідролізатах).

Мезгу згодують худобі; *клітинний сік*, що містить білки, амінокислоти, вуглеводи, органічні кислоти, мікроелементи, ферменти, вітамін є цінним живильним середовищем для вирощування мікроорганізмів. *Кукурудзяний екстракт*, одержуваний упарюванням до 45–50 % сухих речовин, використовують у харчовій промисловості і як субстрат у мікробіологічній промисловості.

Відходи *спиртового, виноробного та пивоварного виробництв* – первинна барда (зерно-картопляна, мелясна) – утворюється після відгону спирту, вторинна – після вирощування кормових дріжджів на зерно-картопляній або мелясній барді, лютерна вода, головна (ефіро-альдегідна), виноградні вичавки та гребені, винний камінь, зернові відходи, сплав зерна, пивна дробина, хмелева дробина, солодові паростки, білковий відстій, осадові дріжджі, вуглекислий газ бродіння та ін.

Барда містить органічні кислоти – до 20 % від сухих речовин (СР),

редуючі речовини – до 7 % від СР, амінокислоти – до 3 % від СРВ, гліцерин та інші спирти – до 6 % від СР, тверду фазу (біомаса дріжджів, часточки подрібненого солоду). Оскільки вміст окислюваних речовин у барді є великим (табл. 1.3), скидання її у водоймища призводить до сильного їх забруднення.

Таблиця 1.3. Типовий склад барди різного походження як джерела забруднень

Показник	Походження барди		
	Спиртова	Коньячна	Лікєро-горілочана
ХСК, мгО ₂ /л	60 000–70 000	20 000–25 000	35 000–45 000
БСК ₅ , мг О ₂ /л	27 000–33 000	12 000–15 000	19 000–23 000
Зважені речовини, мг/л	50 000–60 000	1500–3100	4000–55 000
pH	4,9–5,0	4,6–4,7	3,7–3,8
Азот:			
загальний, мг/л	1300–1500	260–280	700–850
амонійний, мг/л	300–500	2,5–3,0	140–160
Фосфор, PO ₄ ³⁻ , мг/л	250–350	250–350	220–380

Високий вміст речовин, що окислюються, не дозволяє скидати барду безпосередньо в спорудження аеробної біологічної очистки. Однак її можна знешкоджувати двоступінчастою анаеробно-аеробною переробкою, видаляючи до 95 % речовин, що містяться в барді, на анаеробній стадії з подальшою доочищенням на аеробній. Така обробка набула поширення в багатьох країнах.

Барда, особливо її тверда фаза має високу кормову цінність. У ряді країн Західної Європи зерно-картопляна барда вважається основним продуктом невеликих спиртових заводів, а спирт виробляється як побічний продукт. На великих українських спиртових заводах об'єм барди, що утворюється, великий. Весь об'єм барди у натуральному вигляді не вдається повністю згодувати сільськогосподарським тваринам. Для зменшення об'ємів барду упарюють або можуть повертати у виробництво (на стадію замісу) після виділення з неї твердої фази (об'єм барди, що утворюється, скорочується на 40–50 %) або піддавати додатковій біотехнологічній обробці, наприклад, пропіоновокислими бактеріями.

Випарену барду можна використовувати як кормовий продукт і як добрива. Як добриво вона за вмістом азоту і калію в 10 разів перевищує гній, а за вмістом фосфору – в 2 рази. У Франції середня норма внесення випареної 70 % барди становить 3 т/га. Для її внесення застосовується спеціальна високоефективна техніка. Як добриво ефективного використання і нативного (бардяного) осаду без очищення та переробки. Є приклади використання барди у хімічній промисловості, а також у будівництві для виготовлення пластифікаторів до бетонів.

Лютерна вода спиртзаводів, що містить у своєму складі висококиплячі складні ефіри та кислоти, виділяється при відгоні та концентруванні спирту в ректифікаційній та сивушній колонах. Лютерна вода має кислу реакцію, агресивна по відношенню до звичайної сталі. Вихід її півтора-дворазовий за кількістю спирту за умови закритого обігріву ешюраційної та спиртової колон і приблизно чотириразовий за умови відкритого обігріву. Лютерна вода містить у своєму складі висококиплячі складні ефіри та кислоти. Кількість лютерної води на 1 декалітр спирту за умови відкритого обігріву 35–45 л з колони ректифікації і 6–8 л з сивушної, за умови закритого обігріву відповідно 15–25 і 1,0–1,5 л. З лютерною водою відводяться труднолеткі домішки спирту.

Лютерну воду в даний час використовують для промивання та обробки сивушної олії в процесі брагоректифікації, гідроселекції в колоні для розгону головної та ешюраційної фракцій, для приготування зернових замісів та меласного сусла. Однак основна кількість лютерної води не використовується і відводиться зі стічними водами.

Сумарна кількість *головної і сивушної фракцій* становить 3–4 % від кількості етанолу, що виробляється. Головна фракція етилового спирту являє собою водно-спиртову рідину з легколетучими домішками: альдегідами, ефірами, кислотами, метанолом та ін. Головна та сивушна фракції використовуються лише на 3–5 % у зв'язку з високими енерговитратами та складними схемами переробки. Головна фракція частково утилізується перегонкою на спеціальних установках ректифікації з метою отримання харчового етилового спирту, а також для виробництва технічного і денатурованого спиртів. Сивушна фракція використовується в основному у вигляді палива для спалювання в ко-тельних спиртових заводів. Але при більш складній переробці з сивушної олії отримують чисті вищі спирти (аміловий, бутиловий і пропіловий), які застосовуються як розчинники, в органічному синтезі, як високооктанові присадки, для приготування лакових покриттів, при виготовленні медичних препаратів і запашних речовин, як компоненти низькозамерзаючих рідин.

Один з напрямів переробки *осадових дріжджів* полягає в одержанні з них біосорбентів. За іншим варіантом з біомаси вилучають різні внутрішньоклітинні компоненти і отримують амінокислоти, препарати нуклеотидної та білкової природи, ростові фактори для мікробіології, біологічно активні добавки та біологічно активні речовини для медичних цілей, косметології. В Україні нині розроблено низку технологій такої комплексної переробки. Один з варіантів включає деструкцію дріжджів методом автолізу або ферментолізу, відділення амінокислот від баластних речовин на іонітах, фільтрацію, упарювання і сушіння. До основної технологічної лінії долучають

вторинні – отримання нуклеотидів і кофакторів.

Діоксид вуглецю утворюється в основному на двох стадіях спиртового виробництва: у процесі дріжджогенерування і безпосередньо під час бродіння в бродильних апаратах. На стадії бродіння вміст CO₂ у газах становить 98–99 %. Теоретичний вихід CO₂ становить 95,5 % до маси спирту або 7,53 кг на 1 дал виробленого спирту.

Якість твердого або рідкого CO₂, одержуваного на спиртових заводах, відносно низька, що обумовлено присутністю в ньому значної кількості супутніх летких продуктів бродіння, таких як спирти, ефіри, альдегіди, органічні кислоти. Без попереднього очищення при утилізації CO₂ з газів бродіння вони залишаються у готовому продукті, надаючи йому характерний запах. Використання неочищеного газу в харчових виробництвах призводить до помутніння карбонізованих напоїв та їх скисання, сприяє біологічному розкладанню продуктів. Застосування неякісного діоксиду вуглецю в машинобудуванні (у зварювальному виробництві) також неприпустимо, оскільки наявність сторонніх домішок викликає пористість зварного шва. Тому в останні роки все більша перевага надається діоксиду вуглецю, що отримується з димових газів котелень, що пояснюється відсутністю в готовій продукції запахів і домішок, характерних для CO₂, що утилізується з газів бродіння. Одна з найбільш сучасних технологій очищення газоподібного CO₂ полягає в каталітичному окисненні супутніх органічних домішок до вихідних компонентів – CO₂ і води.

Відходи *плодоовочевого виробництва* – плоди, плодові кісточки, некондиційні соки, вичавки і т. п. За допомогою мікроорганізмів такі відходи можна переробляти в кормовий продукт, збагачений мікробним білком.

Відходи *м'ясної, птахопереробної та рибної промисловості*, а також шкіряної та хутряної промисловості – білок- та жировмісні відходи, колагеновмісна (шквара, фасції, шкірка, жилка) та кератинвмісна (роги, копита, шерсть, щетина, малоцінне перо,) сировина, м'ясо-кісткове борошно, рибне борошно, хітин та ін. Багато з цих відходів переробляються в різні харчові та кормові добавки, амінокислотні гідролізати та пептидні композиції. Вони можуть використовуватися в хутровому звірівництві при годівлі хутрових звірів, у мікробіологічній промисловості як компонент у складі поживних середовищ для культивування мікроорганізмів, у косметичній промисловості у складі лосьйонів, шампунів, поживних кремів тощо, а також перероблятися в органомінеральні добрива.

Хітин – головний компонент клітинної стінки грибів, опорного скелета багатьох безхребетних, зокрема рачків; являє собою полімерний ланцюг, що складається із залишків глюкози, в яких гідроксильні групи при другому атомі

вуглецю заміщені ацетильованими аміногрупами. Використовується в медицині, харчовій промисловості, косметиці. Світовий обсяг вироблених продуктів з використанням хітину та його похідних становить кілька млрд дол.

Відходи *олійно-жирової промисловості* – макухи та шроти, соняшникова мезга, фосфатидні концентрати, соапстоки, одержувані в результаті нейтралізації рослинних олій і жирів, відходи, що утворюються при рафінації, гідрогенізації та переетерифікації рослинних олій і жирів, гудрон.

Відходи *тютюнової промисловості*, що утворюються при вирощуванні та ферментації тютюну на тютюнових фабриках.

Відходи *ефіро-олійного виробництва* – від переробки зернової ефіроолійної, квітково-трав'янистої сировини, переробки ефірних олій.

Відходи *виробництва харчових кислот* – міцелій, фільтрат цитрату кальцію, гіпсовий шлам, вапняний осад від виробництва молочної кислоти. *Фільтрат цитрату кальцію* утворюється при фільтруванні суспензій, нейтралізованих вапняним молоком ферментованих меласних розчинів в обсязі 7 м³ на 1т кристалічної лимонної кислоти при поверхневому і близько 15 м³ при глибинному способах виробництва. Містить 10 % СР, у тому числі органічних речовин 80 %, амінокислот – до 6 %. Фільтрат цитрату кальцію використовується для стимулювання росту хлібопекарських дріжджів та біосинтезу лізину з меляси, а також для годування тварин (у випареному вигляді).

Відходи *молочної промисловості* – молочна сироватка (сирова, підсирна, казеїнова), знежирене молоко, пахта. Вміст основних компонентів у цілісному, знежиреному молоці, пахті та молочній сироватці наведено у табл. 1.4. Ультрафільтрацією із сироватки виділяють харчовий білок і отримують безбілковий ультрафільтрат. Під час виділення білків молока біополімерами в залишку отримують безказеїнову фазу молока.

Таблиця 1.4. Вміст основних компонентів у цілісному, знежиреному молоці, пахті та молочній сироватці, %

Показники	Молоко цільне	Молоко знежирене	Пахта	Сироватка молочна
Сухі речовини, %	12,5	8,9	9,0	6,2
Вміст жиру, %	3,8	0,05	0,5	0,1
Вміст білку, %	3,3	3,3	3,3	1,0
Вміст лактози, %	4,7	4,8	4,7	4,7
Вміст мінеральних солей, %	0,7	0,7	0,7	0,6
Калорійність, кДж	2805	1440	1590	1013

Знежирене молоко, що утворюється при сепаруванні незбираного молока з метою виділення жиру, переробляють в молочні продукти для

безпосереднього споживання – напої, згущене молоко, молочно-картопляне пюре та ін. Знежирене молоко містить високоцінний білок, який може бути виділений і використаний для харчових цілей, у дитячому харчуванні, в дієтичних продуктах і для кормових цілей.

Пахта утворюється як відхід при отриманні вершкового масла. Вміст жиру в пахті в 10 разів більший, у тому числі фосфатидів в 11 разів більше, ніж у знежиреному молоці. Вона використовується для нормалізації незбираного молока за жиром. З неї виробляють молочні продукти зниженої енергетичної цінності, свіжі та сквашені напої, добавки в молочні та харчові продукти, морозиво, концентрати, сири, білкові продукти. Як кормові продукти пахту і обрат використовують як замітник цільного молока для випоювання молодняку і годівлі тварин.

Молочна сироватка, що залишається при виробництві сиру або казеїну, залежно від способу її отримання поділяється на підсирну, сирну і технічну (казеїнову). У середньому при виробництві 1 кг сиру вивільняється 1,5–4 кг сироватки, 1 кг сиру – 8–10 кг, 1 кг казеїну – до 30 кг молочної сироватки. Світове виробництво молочної сироватки становить 80 млн т на рік. Значна її кількість виробляється в тих країнах, де є промислове виробництво сиру.

Склад сироватки схильний до значних коливань в залежності від вихідної сировини (цілісне або знежирене молоко) і від способу відділення білка (дією органічних та мінеральних кислот, ферментативним способом, ультрафільтрацією). У середньому сироватка містить до 48–52 % сухих речовин молока. Під час вироблення твердих сирів у сироватку переходить 9–14 % жиру, 20–25 % білка, 88–94 % лактози, 59–65 % мінеральних речовин. Особливо високий вміст лактози – до 5 % від маси сироватки. До її складу входять також органічні кислоти – до 1 %, білок – близько 1 %, небілкові азотисті речовини, мінеральні речовини та мікроелементи, вітаміни. При виробництві деяких видів сирів частину сироватки (близько 30 %) одержують солоною. Вміст кухонної солі у солоній сироватці становить 0,5–1,5 %, інколи ж до 4 %. Склад різних видів молочної сироватки наведено у табл. 1.5.

Таблиця 1.5. Склад різних видів молочної сироватки

Компонент	Підсирна	Сирна	Казеїнова
Вміст сухих речовин, %	4,5–7,3	4,2–7,4	4,5–7,5
Вміст білку, %	0,4–1,1	0,5–1,4	0,5–1,5
Вміст жиру, %	0,04–0,6	0,05–0,4	0,02–0,1
Вміст лактози, %	3,9–5,2	3,2–5,1	3,5–5,2
Вміст мінеральних речовин, %	0,3–0,8	0,3–0,8	0,3–0,9

Скидання молочної сироватки в стічні води призводить до сильного забруднення водойм. Тонна молочної сироватки, злита в стічні води, забруднює водойму так само, як 100 м³ господарсько-побутових стоків. Органічні кислоти (в основному молочна), що утворюються в процесі скисання молока, підкислюють стічні води до рН 4–5. Витрати на очищення стічних вод, забруднених сироваткою, яку отримують на сироварному заводі при переробці 50 т молока за зміну, рівноцінні витратам на очищення стічних вод у місті з населенням 80 тис. чоловік. Екологічні показники сироватки як джерела забруднень при скиданні на стоки наведені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6. Показники молочної сироватки як джерела забруднень

Показник	Значення
ХСК, мг О ₂ /л	65 000–77 000
БСК, мг О ₂ /л	52 000–58 000
Зважені речовини, мг/л	2000–5000
рН	4,4–6,3
Жир, мг/л	1000–4000

У багатьох країнах утилізується до 80–90 % молочної сироватки. З цієї кількості 50–90 % згодовується худобі, 0,5–4 % прямує на технічні потреби, 7–50 % переробляється в харчові та кормові продукти.

В Україні утилізується не більше 30–40 % сироватки – в основному для випоювання телят і в раціоні м'ясної худоби, що відгодовується. Решта об'єму відходу скидається в стоки. При скиданні в очисні споруди неутілізована сироватка сильно ускладнює очищення стічних вод через високі значення ГСК сироватки (понад 60 000 мг/л).

Недоліки сироватки як кормового продукту – низький вміст поживних речовин (до 5–7 % за вмістом сухої речовини), незбалансованість її складу (високий вміст лактози та низький – білка), короткий термін зберігання. Як продукт, що швидко псується, сироватка має бути згодована тварині протягом найближчої доби після її отримання. Це складно реалізувати для великого молокозаводу, на якому утворюється щодобово 50–100 і більше тонн молочної сироватки, оскільки зона можливого згодовування такої кількості може досягати 100 км і більше. Крім того, під час відгодівлі сироваткою можливе поширення різних інфекцій, у зв'язку з чим у ряді країн заборонено відправляти сироватку на ферми без попередньої пастеризації.

Тому на багатьох підприємствах сироватку піддають різній обробці з метою виділити окремі складові (жир, білки, молочний цукор) або підвищити вміст сухих речовин. Згущену або висушену сироватку можна перевозити,

зберігати і переробляти в інші продукти, але отримання її в такому вигляді вимагає багато енергії або тепла на видалення вологи.

Іншим енергоекономічним способом утилізації сироватки є метаногенне зброджування з отриманням біогазу.

В даний час з молочної сироватки отримують кормовий мікробний білок, харчові продукти (молочний цукор – лактозу, лікувально-профілактичні та столові напої, згущені та сухі концентрати, морозиво, продукти біологічної обробки, білкові продукти і т. п.), галактозу (після гідролізу лактози з утворенням глюкози та галактози та ферментації на глюкозі), етанол, молочну кислоту, пропіонову кислоту (на підсирній сироватці), бутиленгліколь, полісахарид ксантан, лактулозу, лактинол, лактобінову кислоту. Перелік продуктів із молочної сироватки налічує понад 1000 найменувань і постійно поповнюється. Біотехнологічні методи вважаються одними з найбільш привабливих під час промислової переробки молочної сироватки. Нажаль, впровадження цих методів в Україні стримується відносно високою інвестиційною вартістю та їхньою недостатньою техніко-економічною ефективністю.

1.4 Відходи з очисних споруд

Відходами з очисних споруд є *осадовий мул* та *активний мул*. За об'ємом кількість щорічно активного мулу та осадів, що утворюються, можна порівняти з кількістю промислових та побутових відходів. У європейських країнах загальна кількість осадів з очисних споруд в 2020 р. досягла майже 10 млн. т за вмістом сухої речовини. У домогосподарствах без централізованої каналізаційної мережі одного жителя накопичується 70–80 л осаду на рік. Осади та надлишковий активний мул утворюються в процесі механічного, біологічного та фізико-хімічного (реагентного) очищення стічних вод.

Витрати на переробку та ліквідацію осадів можуть становити до 50 % усіх витрат на очищення стічних вод. Вартість переробки мулу велика через його високу вологість (90–99,7 %), підвищений вміст шкідливих речовин та патогенних мікроорганізмів.

В даний час в Україні 90–95 % від кількості сильнообводнених осадів і активного мулу, що виробляється, зневоднюють флотацією, центрифугуванням або віджимом на фільтр-пресах, вивозять в накопичувачі або відвали, на мулові майданчики, поля фільтрації, майданчики-ущільнювачі, підземне зберігання у рідкому чи зневодненому вигляді. Ці споруди займають величезні площі,

забруднюють ґрунт, водойми та атмосферне повітря. У даних спорудах мул зберігають від 1 до 10 років і лише після цього вивозять на поля. У найбільш промислово розвинених країнах, особливо малоземельних, у регіонах з теплим та посушливим кліматом, осади депонують на полігонах з облаштуванням, що виключає забруднення ґрунтових вод. Велику кількість мулу утилізують як добрива для ґрунтів, призначених для сільськогосподарського виробництва або необроблених, використовують при рекультивації техногенно порушених територій, створенні штучних ландшафтів, аеробно стабілізують та компостують, анаеробно зброджують у метантенках.

Частка утилізованих осадів стічних вод у країнах становить від 35 % (у США) до 90 % (у Люксембурзі). Решта, в основному, зберігається в ґрунті або термічно сушиться і спалюється.

Залежно від технологій обробки та зберігання осади можуть використовуватися в рідкому вигляді (вологістю 92–96 %) або у вигляді сипучої маси (50–70 %), а також у вигляді компостів. При розташуванні полів утилізації на незначній відстані від очисних споруд рідкий осад перевозиться в цистернах або перекачується до місць використання за допомогою насосів високого тиску. Осад розпорошується по ділянках, закачується в підґрунтовий шар або розподіляється по борознах з подальшим покриттям землею. На значні відстані від очисних споруд (понад 25 км) перевозиться головним чином механічно зневоднений осад. Він розподіляється по полях за допомогою машин, що заорюють його.

Застосування осадів стічних вод як органо-мінерального добрива є одним з найбільш раціональних шляхів їх використання. Осади багаті азотом, фосфором, мікроелементами, необхідними для розвитку рослин. За удобрювальними властивостями вони близькі до органо-мінеральних компостів та підстилкового гною.

Елементний склад сухої речовини осадів коливається в широких межах (% мас. від СР осаду): карбон – 35,4–87,8; гідроген – 4,5–8,7; сірка – 0,2–2,7; нітроген – 1,6–8; кисень – 7,6–35,4. В осадах містяться сполуки кремнію, алюмінію, заліза, оксиди кальцію, магнію, калію, натрію, цинку, нікелю, хрому та ін. Основну частину сухої речовини осаду з первинних відстійників (в середньому 60–75 %) становить органічна речовина, якому міститься білків приблизно в 2 рази менше, а вуглеводів у 2,5–3,0 рази більше, ніж в активному мулі. Осади, які отримують після біологічного очищення стічних вод, зазвичай мають рН 6,5–8,0. Вміст у них біогенних елементів залежить від типу та походження осадів (табл. 1.7).

Реагентні осади стічних вод, зазвичай, містять у 1,5–2,0 рази менше доступного фосфору, ніж безреагентні, що з попередньою обробкою осадів вапном чи хлорним залізом. Найбільш багатий азотом та фосфором активний мул.

Таблиця 1.7. Вміст основних поживних речовин в осадах міських очисних споруд, % маси сухої речовини

Поживні речовини	Сирий осад	Активний мул	Зброджений осад	Суміш осаду первинних відстойників та активного мулу
Азот (N)	1,5–8,0	2,4–10	1,7–7,5	2,0–5,0
Фосфор у перерахунку на P ₂ O ₅	0,6–5,2	2,3–8,0	0,9–6,6	1,0–6,0
Калій у перерахунку на K ₂ O	0,1–1,0	0,3–0,7	0,2–0,6	0,2–0,5

Осади стічних вод мають невеликий запас доступного калію, і їх застосування повинно супроводжуватися додатковим внесенням у ґрунт мінерального калію. Джерелом калію може бути вугільна зола ТЕС чи інших виробництв.

Зброджений осад містить менше поживних речовин у твердому компоненті осаду. Вміст азоту, наприклад, може знизитися на 30–40 % за рахунок переходу його в аміак або розчиняються у водній фазі солі амонію. Знижується і вміст фосфору. При внесенні зброженого осаду разом з муловою водою в ґрунт потрапляє більше поживних речовин, ніж при використанні зневодненого. При застосуванні технології обробки осадів вапна вони можуть використовуватися як вапняні добрива.

Використання осадів та активного мулу *на сільськогосподарських полях* у нативному або переробленому вигляді утруднено, що обумовлено не тільки високою вартістю попереднього зневоднення або вивезення у незневодненому вигляді, але й високим вмістом важких металів, токсичних органічних сполук, патогенних мікроорганізмів та яєць гельмінтів, необхідністю більш строгих норм контролю складу внесених осадів. Тому в багатьох країнах допускається лише підґрунтове внесення необробленого осаду, обмежується доступ людей до місць поверхневого використання осаду, не допускається випас худоби на пасовищах з внесеним осадом стічних вод, збирання врожаю продукції протягом певного часу з моменту внесення. Токсичний мул, що містить велику кількість важких металів, як правило, спалюється після зневоднення та сушіння.

Для використання осадів очисних споруд, наприклад, як *добрива*,

необхідне здійснення попередньої обробки – зневоднення, зменшення вмісту в них патогенних мікроорганізмів, важких металів, виключення привабливості їх для переносників інфекцій.

Для *зnezараження* осадів в рідкому або зневодненому вигляді застосовуються анаеробне зброджування в септитенках і двоярусних відстійниках (емшерах), зброджування в метантенках в термофільному режимі, пастеризація, метод аеробної стабілізації з попереднім прогріванням, обробка вапном, опромінення інфрачервоними променями в камерах дегельмінтизації; тривале підсушування на мулових майданчиках; компостування протягом 5–6 місяців, термомеханічна або радіаційна обробка. Всі ці методи є затратними, тому в Україні досі осади стічних споруд та активний мул у своїй більшості складаються. Крім того, вимоги вітчизняної нормативної документації до осадів стічних споруд більш суворі. Так, у Німеччині осади стічних вод із вмістом органічної речовини понад 5 % вносять на поля, а не захоронюють, що пов'язано з біологізацією землеробства та відсутністю в країні реальних джерел органічної речовини, таких як торф, сапропель тощо. В Україні ж в поле дозволяється вносити лише осади із вмістом органічної речовини понад 20 % (у вологому осаді). Осади з меншим вмістом органічної речовини депонуються. За вмістом патогенних мікроорганізмів і важких металів вітчизняні агроекологічні вимоги відповідають міжнародним стандартам. З цих причин частка осадів, що використовуються як добрива, є невеликою і становить близько 7 %.

Активний мул локальних очисних споруд стічних вод підприємств, що випускають харчові та кормові продукти, не містить важких металів або концентрація їх є незначною, що полегшує його утилізацію як органічне добриво після попередньої обробки та зnezараження. Для скорочення дози внесення осаду в ґрунт його застосовують у суміші з торфом, компостом, різними добавками, вапном, мінеральними добривами та мікроелементами.

При дотриманні нормативних вимог осади стічних вод та мул можна застосовувати в лісовому господарстві, для вирощування технічних культур, у парниках з вирощування декоративних культур та квіткових рослин, для озеленення міських територій, формування ґрунту на піщаних та гравійних землях, відновлення її структури на непрямих землях, локалізації полігонів твердих побутових відходів, залучення до господарського обороту вироблених торфовищ, рекультивації земель, структура яких порушена під час видобутку корисних копалин, а також відвалами різних виробництв. При цьому вживаються заходи щодо захисту підземних водних джерел, особливо якщо осад застосовується у рідкому вигляді.

При *похованні* осадів з одночасним їх використанням з метою озеленення та благоустрою ландшафтів враховують рівень розташування ґрунтових вод та максимальної повені. За одним із методів поховання опадів проводять пошарово, чергуючи шар осадів (товщиною 2 м) і піску (1 м) як перекриття. У такий спосіб можна відсипати пагорби висотою 12–15 м із крутістю укосів 8–9°. Останній піщаний шар перекривають протифільтраційним шаром глини потужністю 0,5 м. Поверхню закривають шаром родючого ґрунту 0,3–0,5 м або ґрунту, придатного до окультурення. Для озеленення пагорба висівають трави та використовують деревні чагарники. Вторинне виділення газів запобігається введенням у конструкцію спеціальних свердловин, обладнаних газовими фільтрами.

При *тимчасовому зберіганні* осадів, зокрема в зимовий період, осади складають на рівній сухій місцевості, в природних западинах, кар'єрах із щільними ґрунтами, на закритих або відкритих обладнаних майданчиках з дренажем, обвалуванням, системами відведення та очищення дренажних вод, механізацією вантажно-розвантажувальних робіт, з урахуванням ландшафту, рози вітрів, рівня ґрунтових вод, далеко від існуючих водозабірних споруд, районів великого скупчення людей, зон відпочинку.

Для використання як *добрив* осади та мул доцільно попередньо обробляти біологічними методами: аеробною стабілізацією, компостуванням або анаеробним зброджуванням, в результаті чого знижуються їх об'єм, санітарна та екологічна небезпека, підвищується їх удобрювальна ефективність. У Німеччині, наприклад, як добрива використовують тільки стабілізовані осади стічних вод, термічно висушені, компостовані і пастеризовані.

Широко застосовується біокомпостування осадів з різними добавками. Осади змішують з твердими наповнювачами (рослинними відходами, тирсою, тріскою, корою, торфом, сміттям, твердими побутовими відходами), гноєм, послідом. Органічні наповнювачі не тільки створюють умови для ефективного компостування та знезараження осадів, а й зменшують газоподібні втрати азоту, вміст важких металів та інших шкідливих речовин у компості, що покращується, покращують фізичні властивості компосту, що важливо для його рівномірного внесення в ґрунт. Для зв'язування важких металів і перекладу їх у нерозчинну форму осади обробляють вапном.

Важкі метали доцільно видаляти біовилугованням осадів, наприклад тіоновими та залізобактеріями.

Спалювання осадів використовується для отримання енергії та поширене у Західній Європі, США, Японії. Установки зі спалювання займають малу

площу, незалежні від погодних умов, скорочують транспортні витрати, при цьому кількість залишкового зольного продукту незначна, витрати на депонування невеликі, його можна безпечно використовувати в дорожньому будівництві. Для спалювання осадів застосовують циклонні, барабанні, вихрові та багатоярусні (подові) печі або котли, печі з киплячим шаром.

Циклонні топки застосовуються для спалювання осадів на станціях аерації середньої продуктивності.

Барабанні печі використовуються переважно для спалювання токсичних осадів, зокрема осадів хімічних виробництв.

Подові печі застосовуються при спалюванні осаду як добавки до основного палива, наприклад, при спалюванні твердих побутових відходів.

У печах з киплячим шаром як інертний носій часто використовується пісок. Механічно зневоднений осад подається безпосередньо в шар піску, змішується з ним потоком нагрітого повітря, налипає на його частинки та утримується до висихання та часткового згорання.

Спалювати осади стічних вод є економічно вигідним за вологості трохи більше 65 %, теплоті згорання мулу вище 12000 кДж/кг, тому спалюють лише попередньо зневоднені осади. Теплота згорання осадів, що зневоднені фільтруванням, становить 11000–25000 кДж/кг. Сирі осади мають більшу теплоту згорання, ніж зброджені. За складом горючої маси і теплоті згорання зневоднені осади міських стічних вод є близькими до торфу.

Капітальні витрати при спалюванні осадів високі, є необхідною велика витрата енергії на видалення вологи. Крім того, органічна речовина осадів, яку можна застосувати як цінний продукт, втрачається, викиди газів в атмосферу значні, в них можуть міститися діоксини та інші високотоксичні речовини, тому в технології необхідні складні та надійні системи газоочищення. З цих причин спалювання осадів в Україні практично не використовується, а за кордоном в останні роки частина установок для спалювання осадів демонтується і замінюється на більш економічно доцільні системи, зокрема компостування, термосушіння або піролітичний розклад осадів.

Для зменшення витрат на видалення вологи та спалювання багато країн застосовують *спільне спалювання твердих побутових відходів та осадів стічних вод*. У цьому випадку побутові відходи попередньо сортуються і готуються для використання як основне паливо. При такому способі вміст твердих речовин в осадах має бути не нижче 40 %, а сумарна вологість трохи більше 60 %. Така спільна утилізація дозволяє отримати додаткову теплову та електричну енергію, будівельну сировину на основі золошлакових відходів і

брикетоване паливо.

На великих підприємствах з переробки осадів стічних вод одна частина висушених та знешкоджених осадів може використовуватися як добрива, а інша частина спалюватись. Взимку, коли потреба у теплоті зростає, а в добривах – скорочується, термічно висушені осади стічних вод доцільно спалювати разом із твердими побутовими відходами, а решту часу використовувати як добрива.

Повітряне та теплове висушування проводять для обробки осадів з високим вмістом органічної речовини. При м'якому режимі обробки органічні речовини зберігаються майже повністю, проте вони не знезаражуються. Осади, термічно висушені за підвищеної температури, є нешкідливими в санітарному відношенні, не загнивають, зручні при транспортуванні, зберіганні та внесенні в ґрунт як добриво.

Зменшити витрати тепла на видалення вологи з осадів можна, застосовуючи *технологію сушіння за допомогою нагрітих металевих кульок*. Нагріті кульки змішуються з вологим осадом, відокремлюються від висушеного матеріалу і повторно нагріваються. Витрата енергії під час сушіння металевими кульками становить лише 20–30 % від витрати енергії при використанні класичного сушіння. Вилучені осади надалі спікають за температури 1000 °С або сплавляють за вищої температури. Другий варіант є більш витратним. При такому варіанті обробки органічні забруднення спалюються, неорганічні (важкі метали) – включаються в кристалічну структуру і стають нерухомими.

Висушені осади можуть бути використані як вихідна сировина для отримання вуглецевого сорбенту методом *піролізу* (рис. 1.2), рідкого палива («сирої нафти»), пального газу, інших цінних продуктів при сухій перегонці опадів або їх окислювально-гідролітичної деструкції. Низькотемпературний піроліз проводять за температури 250–600 °С в бідному кисневому середовищі. Можливий спільний піроліз твердих побутових відходів і механічно зневоднених осадів стічних вод, при цьому утворюється значно менше золи, ніж при звичайному процесі спалювання відходів і осадів.

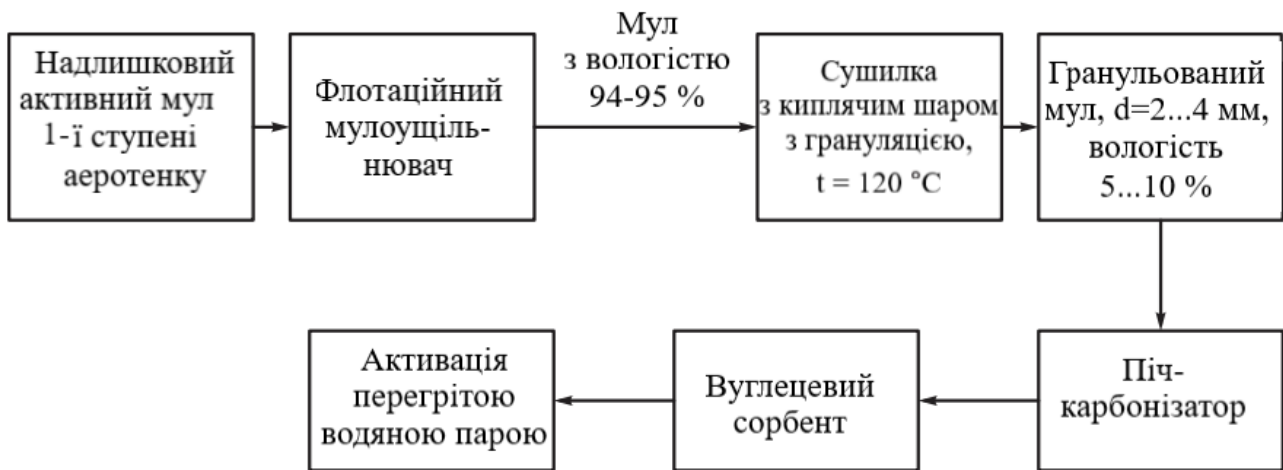


Рис. 1.2. Одержання вуглецевого сорбенту на основі активного мулу

При переробці в *сорбент* методом піролізу мул попередньо гранулюють, наприклад, в сушарці з киплячим шаром, потім карбонізують (коксують) у печі і активують водяною перегрітою парою. Отриманий сорбент може використовуватися безпосередньо на очисних спорудах для зниження кольору та залишкового вмісту органічних речовин. Переробці осадів стічних вод шляхом піролізу заважає великий вміст в них азоту. Видалення сполук азоту зі складу одержуваних продуктів, зокрема «сирої нафти», є складним завданням.

Активний мул також знаходить застосування в дорожньому будівництві, як сировина для виробництва будівельних матеріалів, добавок до цементу, наповнювачів бетону, клінкерної цегли, керамічних виробів, пластмас, картону, волокнистих плит, що покращує їх властивості, економить основні матеріали.

За одним із варіантів осади обробляють негашеним вапном. У результаті саморозігріву суміші або при додатковій термообробці осади і вапно спікаються в зерна, розмір і якість яких залежать від співвідношення осаду і вапна. Отриманий зернистий матеріал використовується у дорожньому будівництві. За іншим варіантом стічні води та осади обробляють хлоридом або сульфатом заліза (III) і вапном. Додавання 1–2 % осаду до суміші при приготуванні бетону призводить до його зміцнення порівняно з бетоном, що виробляється за звичайною технологією.

Осади та шлами після відповідної обробки можуть утилізуватися як реагенти для коагуляції та флокуляції осадів міських стічних вод, для отримання технічних жирів, технічних миючих засобів. У деяких випадках, наприклад під час виробництва сульфатної целюлози, активний мул можна повертати в процес після його додаткової обробки: продукти гідролізу активного мулу підвищують вихід целюлози і покращують її механічні показники.

Масштаби таких способів утилізації осадів, як піроліз з отриманням

адсорбентів, додавання до будівельних матеріалів, використання як кормових добавок, джерела отримання вітамінів і амінокислот або різних реагентів, незначні у зв'язку з відносною складністю технологій та високою собівартістю. Всі ці методи вимагають суттєвих капіталовкладень (30–40 % вартості очисних споруд) і великих експлуатаційних витрат (20–50 % собівартості очищення).

Донні мул та осади. За своїм складом і властивостями мули і донні відкладення каналів, ставків і спеціальних водойм є найбільш близькими до осадів, що утворюються під час біологічного очищення стічних вод. Відповідно до екологічних вимог складування донних мулів і осадів можливе за умови суворого контролю вмісту в них шкідливих речовин. Для біологічної переробки таких відходів запропоновані біоремедіація, біовилування, фіторе-медіація та інші методи.

1.5 Тверді побутові відходи

Для міст проблема поховання і переробки твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найбільш пріоритетних. В Україні щорічний обсяг ТПВ становить 32 млн т, тобто близько 230 кг на особу на рік. У структурі ТПВ від 70 до 80 % припадає на матеріали, які здатні зазнавати біологічної деградації: макулатуру, харчові відходи, деревину та листя, текстиль (табл. 1.8).

У складі ТПВ переважають макулатура та харчові відходи. В даний час широко застосовують знешкодження ТПВ на звалищах та полігонах. В Україні до 90–92 % їх складують на полігонах. Звалища і полігони займають значні території, які доводиться рекультивувати.

Таблиця 1.8 Усереднений склад міських ТПВ

Компонент ТПВ	Вміст, %
Макулатура	30–40
Харчові відходи	20–30
Дерево, листя	2–7
Скло	3–5
Текстиль	4–6
Шкіра, гума	0,5–2,5
Полімерні матеріали	5–10
Кістки	1–2
Чорні метали	2,5–4,5
Кольорові метали	0,5–0,7
Камені, кераміка	0,8–1,2

Найбільш сучасним економічно та екологічно раціональним варіантом переробки ТПВ є їхня попередня сепарація та сортування з виділенням наступних складових:

– корисних рециркульованих матеріалів (чорних і кольорових металів, пластиків, будматеріалів, бою скла та склопосуду та ін);

– небезпечних матеріалів, що містять сполуки хлору та броду (таких, як хімічні джерела струму, полівінілхлорид) та є джерелом утворення діоксинів та дибензофуранів у разі спалювання відходів за низькою температурою (700–1000 °С);

– органічної частини, що підлягає компостуванню;

– фракцій, що спалюються за високої температури ($t > 1200\text{--}1400$ °С) з подальшою утилізацією або похованням золи та шлаків.

Зі 100 000 м³ ТПВ можна отримати 10 000–15 000 т компосту або ґрунту, близько 2 000 т скловиробів, 2 000 т заліза і залізних виробів, 7 000 т пластичних мас і виробів з них способом екструзії або лиття. Глибокий фракційний розподіл ТПВ дозволяє отримувати роздільно і кольорові метали: *Sn, Al, Pb, Cu* та ін.

Переробка сортованих твердих побутових відходів набула широкого поширення в США, Західній Європі, Японії, де населення безпосередньо бере участь у попередньому сортуванні ТПВ. Витрати на сортування, переробку ТПВ методами спалювання та компостування в цих країнах становлять 350–1600 дол/м³. Високий вміст у відходах органічної речовини дозволяє використовувати їх як низькокалорійне паливо. Спалювання відходів супроводжується утворенням шкідливих летких домішок, золи, тому сміттєспалювальні заводи обладнуються надійною системою їх уловлювання. Застосування сортування, спалювання, інших способів знешкодження та утилізації твердих побутових відходів: компостування, анаеробної ферментації обходиться в 2–3 рази дорожче, ніж поховання, і тому в Україні ще не набуло широкого поширення.

1.6 Промислові відходи

Промисловими відходами є будівельні матеріали, чорні та кольорові метали, скло та кераміка, гумово-технічні вироби, пластики, гальванічні шлами, матеріали, забруднені нафтою, і т. ін. З них особливу категорію складають відходи з високим вмістом *радіонуклідів* та *важких металів*.

За обсягом промислові відходи перевищують ТПВ. Велика частка їх може бути перероблена фізичними, фізико-хімічними та біологічними методами та повторно використана для отримання різних продуктів. Матеріали з додаванням відходів, що здатні до рециклінгу, є дешевшими, під час їх виробництва знижуються енерговитрати і водночас зменшується кількість новоутворених відходів.

Для переробки промислових відходів біотехнологічними методами можна застосовувати наступні методи:

– біовилугування – для видалення важких металів (гальваношлами, доменні шлаки, будівельні матеріали та ін.);

– біодеструкцію органічних матеріалів (наприклад, для перекладу радіонуклідів або важких металів у розчинну форму та подальшої їх обробки фізичними та хімічними методами);

– біомодифікацію – для поліпшення характеристик будівельних матеріалів (бетону, цементу та ін.) при додаванні як сполучні компоненти мікробну біомасу для підвищення міцності пластиків, гумо-технічних виробів, деревних матеріалів та інших відходів при їх вторинній переробці.

Серед відходів техногенного походження одними з найнебезпечніших і перероблюваних є відходи, що містять *радіонукліди*. Основна кількість таких відходів утворюється в ядерно-паливному циклі, з них істотну частину складають рідкі та тверді відпрацьовані низькорадіоактивні матеріали, що використовуються у технологічному процесі. Радіоактивні відходи компактизують і захоронюють, використовуючи такі методи, як прожарювання, спалювання, піроліз, фіксування та стабілізацію (цементування, бітумінування), інкапсулювання.

Біотехнологічна і, в першу чергу, мікробна деструкція може знайти застосування для скорочення загального обсягу твердої складової відходів (компактизації): целюлозовмісних, іонообмінних та ін; біовилужування та біосорбція – для вилучення радіонуклідів із забруднених матеріалів. Економічна доцільність практичного використання методів біодеградації можлива в тому випадку, якщо буде вирішено питання компактизації цих відходів без включення до технологічної схеми обладнання з високою вартістю, матеріалів, а також за умови зниження енергетичних витрат.

Нижче наведено узагальнені дані про можливі біотехнологічні способи знешкодження та переробки відходів розглянутих груп (табл. 1.9).

Таблиця 1.9. Біотехнологічні способи знешкодження та переробки відходів

Відходи	Біотехнологічні способи знешкодження чи переробки
1	2
Рослинні відходи	Компостування, вермикомпостування, силосування, метаногенерація, генерація тепла, біомодифікація, обробка в біореакторах, одержання білка одноклітинних організмів, біопалива, делігніфікація, вирощування грибів

1	2
Відходи, багаті на розчинну органіку (вуглеводи, жири, білки)	Отримання харчових продуктів, кормового білка одноклітинних організмів, біопалива та інших продуктів мікробіологічної та ферментативної переробки, анаеробне зброджування, метаногенерація, обробка в біореакторах
Тверді білок- і жировмісні відходи, осадові дріжджі	Отримання харчових і кормових добавок, компонентів біологічного походження, біологічно активних речовин, різних продуктів мікробіологічної переробки, анаеробне зброджування, метаногенерація, переробка в органо-мінеральні добрива, обробка в біореакторах
Гній та пташиний послід, підстилка	Компостування, вермикомпостування, зброджування, метаногенерація, одержання органо-мінеральних добрив, переробка в кормові добавки, обробка в біореакторах
Осади та активний мул очисних споруд	Анаеробне зброджування в метантенках і септиченках, компостування, вермикомпостування, аеробна стабілізація, переробка на мулових майданчиках, одержання органо-мінеральних добрив
Донні осади	Біоремедіація, біовилування, біорекультивация, фіторемедіація, фітоекстракція, фітостабілізація
Мінеральні суспензії, мулисті наноси, що надходять з поверхневими зливами та зливовими стоками	Агротехнічні прийоми, планування ландшафтів, озеленення, загороджувальні біобар'єри, біоплато, фітостабілізація, фітомеліорація, біофлокуляція
Тверді побутові відходи	Компостування, вермикомпостування, метаногенерація
Гумотехнічні вироби	Біологічна девулканізація, активація вулканізації, біомодифікація
Мінеральні та дерев'яні будівельні матеріали, пластики	Біомодифікація
Пластики	Біодеструкція та біодеградація, отримання біопластиків та біорозкладних полімерних матеріалів
Радіоактивні відходи та матеріали	Біодеструкція, біовилування, біосорбція

Питання з теми:

1. Перерахуйте характеристики, за якими можна класифікувати відходи.
2. Які види відходів придатні біологічної переробки?
3. Перерахуйте складові деревині хвойних та листяних порід, надайте коротку характеристику їхнім технологічним властивостям щодо переробки.
4. Перерахуйте складові відходів целюлозно-паперової промисловості, надайте коротку характеристику їхнім технологічним властивостям щодо переробки.
5. Класифікуйте за походженням відходи сільського господарства, надайте їм коротку характеристику.
6. Які типи відходів відносяться до сільськогосподарської рослинницької діяльності?

7. Дайте визначення евтрофікації водойм. Назвіть основні причини евтрофікації.

8. Опишіть основні технології переробки відходів сільськогосподарської рослинницької діяльності. Назвіть їх переваги і недоліки.

9. Які типи відходів відносяться до сільськогосподарської тваринницької діяльності?

10. Опишіть основні технології переробки відходів сільськогосподарської тваринницької діяльності. Назвіть їх переваги і недоліки.

11. Опишіть основні технології переробки відходів цукрової промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

12. Опишіть основні технології переробки відходів від переробки злакових. Назвіть їх переваги і недоліки.

13. Опишіть основні технології переробки відходів крохмало-патокової промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

14. Опишіть основні технології переробки відходів спиртового, виноробного та пивоварного виробництв. Назвіть їх переваги і недоліки.

15. Опишіть основні технології переробки відходів спиртового, виноробного та пивоварного виробництв. Назвіть їх переваги і недоліки.

16. Опишіть основні способи утилізації та переробки барди. Назвіть їх основні переваги і недоліки, окресліть перспективні технології переробки.

17. Опишіть основні способи утилізації та переробки лютерної води. Назвіть їх основні переваги і недоліки, окресліть перспективні технології переробки.

18. Опишіть основні способи утилізації та переробки осадових дріжджів. Назвіть їх основні переваги і недоліки, окресліть перспективні технології переробки.

19. Опишіть основні технології переробки відходів м'ясної, птахопереробної та рибної промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

20. Опишіть основні способи переробки хітину. Назвіть їх основні переваги і недоліки, окресліть перспективні технології переробки.

21. Опишіть основні технології переробки відходів олійно-жирової промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

22. Опишіть основні технології переробки відходів, багатих на розчинну органіку (вуглеводи, жири, білки). Назвіть їх переваги і недоліки.

23. Опишіть основні технології переробки відходів ефіроолійного виробництва і тютюнової промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

24. Опишіть основні технології переробки відходів молочної промисловості. Назвіть їх переваги і недоліки.

25. Опишіть основні способи переробки молочної сироватки. Назвіть їх основні переваги і недоліки, окресліть перспективні технології переробки.

26. Опишіть основні технології переробки осадового активного мулу з

очисних споруд. Назвіть їх переваги і недоліки.

27. Назвіть основні перешкоди для використання осадів та активного мулу на сільськогосподарських полях. Яким чином їх можна подолати?

28. Опишіть основні види обладнання для висушування осадів очисних споруд.

29. Опишіть основні технології переробки твердих побутових відходів з очисних споруд. Назвіть їх переваги і недоліки.

30. Назвіть основні біотехнологічні методи знешкодження та переробки промислових відходів, дайте їм коротку характеристику.

ГЛАВА 2. МІКРОБІОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

З різних біологічних методів переробки відходів найбільш широко використовуються мікробіологічні. Здатність мікроорганізмів та їхніх ферментів споживати органічні речовини різного складу і будови, розкласти чи трансформувати природні біополімери є основою отримання багатьох корисних продуктів мікробіологічного синтезу і переробки відходів. Методи екобіотехнології застосовують для переробки вуглевод-, білок- та жиромісних рідких відходів, рослинної біомаси, твердих побутових відходів, активного мулу та ін. Можливі варіанти переробки рослинної сировини та целюлозовмісних відходів представлені на рис. 2.1. Найбільш великомасштабні промислові мікробіологічні процеси переробки органічних відходів наступні:

- одержання кормових продуктів, збагачених мікробним білком, або у загальному випадку – білком одноклітинних організмів (БОО),
- силосування,
- компостування,
- анаеробне зброджування,
- біоконверсія в паливо (в етанол, отримання біогазу – метаногенерація, пряма конверсія в тепло).

2.1. Збагачення кормовим білком

Збагачення кормовим білком – один із варіантів переробки біомаси рослин і різних органічних відходів, в основному вуглевод- і целюлозовмісних.

Рослинна біомаса є основним джерелом кормів для сільськогосподарських тварин. Однак кормова цінність більшості рослин є низькою через невисокий вміст білка та кормової незбалансованості. Тому використовують білкові добавки, які дозволяють збалансувати раціони необхідними кормовими компонентами. У цих цілях у тваринництві зазвичай використовуються рибне і м'ясо-кісткове борошно, зернобобові культури, сою, люцерну, конюшину, соняшник, ріпак та ін.

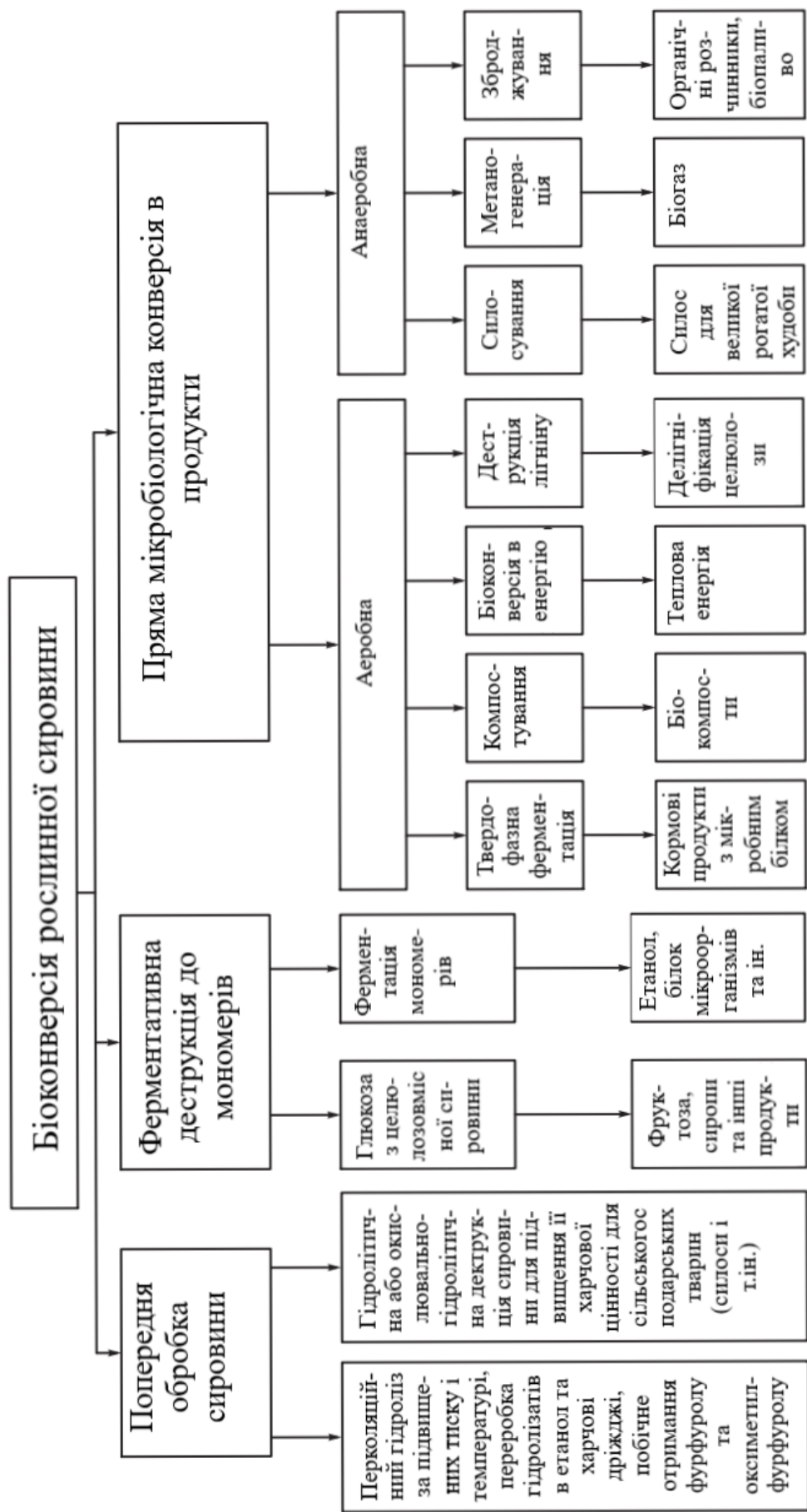


Рис. 2.1. Біоконверсія рослинної сировини в корисні продукти

Кількість білка, яке може бути отримано з 1 га сільгоспугідь під час культивування та переробці різних сільськогосподарських рослин та їх відходів представлено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Кількість білка, яке може бути отримано з 1 га сільгоспугідь при культивуванні та переробці різних сільськогосподарських рослин та їх відходів

Найменування сировини	Кількість продукту (відходу), т/га	Вміст сировини, кг/т		Сирий протеїн, кг/га
		цукру	сирого протеїну	
Зелена маса кукурудзи	38,8	27	13	504
Кукурудза (початки)	6,1	60	29	177
Горох(зерно)	2,0	55	220	440
Соя(боби)	3,5	40	320	1120
Буряк(клубні)				
- цукровий	30,2	120	16	483
- напівцукровий	38,2	80	16	611
- кормовий	40,8	40	13	530
Топінамбур	10,9	63	22	240
Буряковий жом	27,6	50	12	331
Буряковий бій	3,0	2,8	16	48
Кукурудзяна мезга	4,8	65	25	120

У кормові продукти, збагачені білком одноклітинних організмів (БОО), можуть бути перероблені різні відходи: деревообробки, сільського господарства (солома, зелена маса рослин, бадилля тощо), тваринництва (гній і пташиний послід), переробної промисловості (актуальна утилізація барди спиртового виробництва та молочної сироватки), активний мул очисних споруд, сортовані ТПВ.

Як мікроорганізми-продуценти білку використовують дріжджі, бактерії, нижчі міцеліальні гриби. Ферменти застосовують для підвищення доступності та засвоюваності корму тваринами. В результаті отримують білково-вітамінні концентрати, кормові добавки, збагачені білком, незамінними амінокислотами, вітамінами, доступними вуглеводами та мінеральними речовинами. Крім одноклітинних організмів для збагачення білком можна використовувати вищі базидіальні гриби. З 1 кг соломи можна отримати 0,1 кг плодових тіл грибів та приблизно 0,5 кг залишку соломи з міцелієм, що містить 2,5% білка.

Кормовий білок можна також отримати за допомогою дощових хробаків (вермикультури). Вермикультура дозволяє отримувати кормовий білок із різних компостів та гною. З гною від 1000 голів великої рогатої худоби можна отримувати близько 400 кг тваринного протеїну на день.

Найбільш дешевий кормовий білок може бути отриманий з органічної речовини стічних вод, зокрема активного мулу. Однак одержання його можливе лише при незначному вмісті в активному мулі важких металів, інших токсичних речовин, відсутності патогенних мікроорганізмів. З цієї ж причини, а також через низьку харчову цінність і підвищений вміст патогенної мікрофлори для отримання білкового кормового продукту мало придатні й побутові відходи. В даний час на вітчизняному ринку присутній досить широкий спектр різних кормових добавок, збагачених білком одноклітинних організмів і призначених для використання у складі комбікормів для тваринництва, птахівництва та рибницьких господарств.

2.1.1. Технологічні особливості мікробіологічної конверсії у кормовий білок

Ключовою стадією промислового біотехнологічного виробництва є біотехнологічна стадія. Виходячи з принципового вирішення цієї стадії, а також характеру цільового продукту, вимог до його чистоти, вмісту домішок, будується і вся технологічна схема виробництва. Типова схема біотехнологічного виробництва, основні стадії і технологічні процеси, що їх реалізують, представлені на рис. 2.2.

При отриманні кормових продуктів не використовуються дорогі поживні середовища, методи виділення, очищення та концентрування продукту. Технологія отримання кормового продукту з використанням мікроорганізмів включає (рис. 2.3) стадії підготовки сировини, повітря, посівного матеріалу, інші допоміжні операції, стадію ферментації, виділення та концентрування цільового продукту, термічної обробки (плазмолізу), сушіння та упаковки. Мають бути передбачені заходи щодо утилізації відходів, що утворюються, очищення стічних вод і газоповітряних викидів.

Ключова стадія технологічного процесу – *ферментація* в біореакторі (ферментері). На рис. 2.4 представлена схема типового біореактору для культивування мікроорганізмів глибинним способом з подачею основних технологічних потоків в апарат та контролем параметрів ферментації. Системи стерилізації, перемішування, пінорегулювання, автоматизації і біореактор в цілому мають відповідати морфологічним властивостям продуцентів, їх чутливості до сторонньої мікрофлори, потреб у кисні, чутливості поживного середовища до теплової стерилізації.

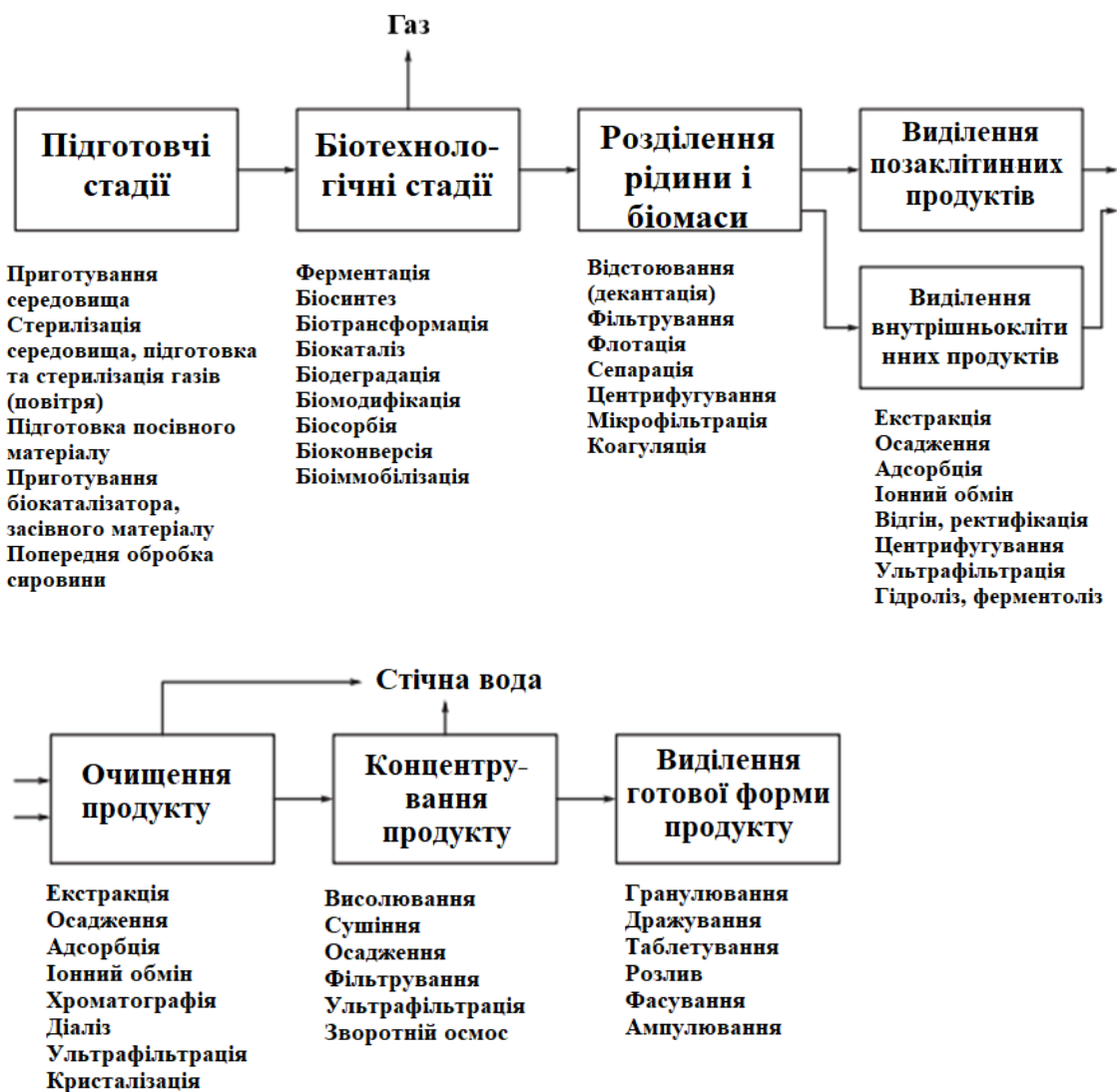


Рис. 2.2. Типова схема, основні стадії та технологічні процеси, що їх реалізують, у біотехнологічних виробництвах.

Процес *виділення* продукту має забезпечувати збереження його якості та біологічних властивостей: запобігти втратам білка, незамінних амінокислот, вітамінів у зв'язку з нагріванням, механічним і хімічним впливом, наявністю мікрофлори забруднень.

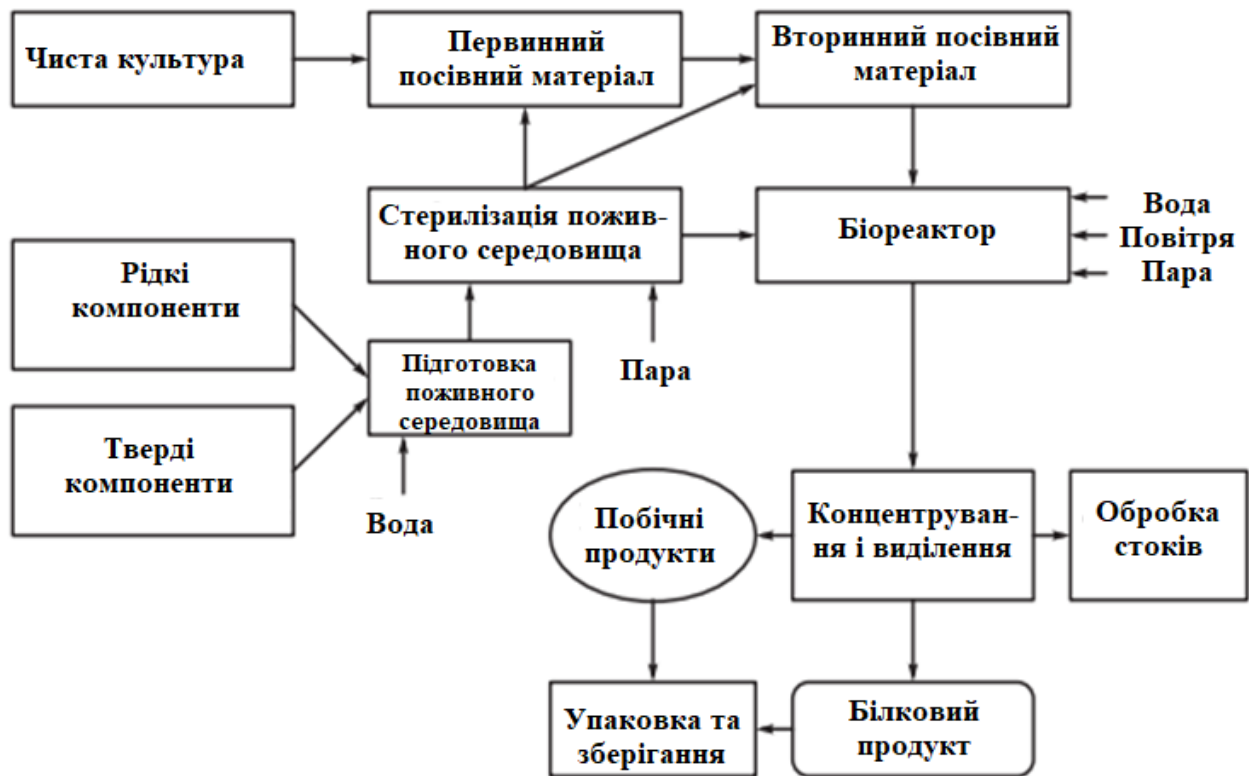


Рис. 2.3. Узагальнена функціональна схема біотехнології отримання кормового мікробного продукту

Вибір біологічних продуцентів. Мікроорганізм, що використовується як продуцент білка, має відповідати низці вимог, серед яких найважливішими є наступні:

- високий коефіцієнт виходу продукту або продуктів із сировини (високий коефіцієнт конверсії);
- висока питома швидкість зростання;
- високий кінцевий рівень накопичення цільового продукту;
- висока спорідненість продуцента до енергетичних субстратів;
- стабільність та невибагливість;
- здатність домінувати у біоценозі ферментера за нестерильних умов культивування;
- стійкість штаму до власних продуктів метаболізму. Це особливо важливо для процесів із рециркуляцією культуральної рідини;
- стійкість штаму до умов культивування, що змінюються у широких межах;
- здатність штаму забезпечувати необхідні якості готового продукту: високий вміст білка, незамінних амінокислот; наявність певної кількості вітамінів у мікробній клітині, невелика кількість нецільових метаболітів у

середовищі культивування;

- технологічні вимоги: задовільна фільтрованість, сепарованість, флотованість, відповідна температура культивування;
- нешкідливість для тварин;
- непатогенність для людини. У деяких людей можлива алергія до певних видів мікроорганізмів, але ця ознака не означає їхню патогенність.

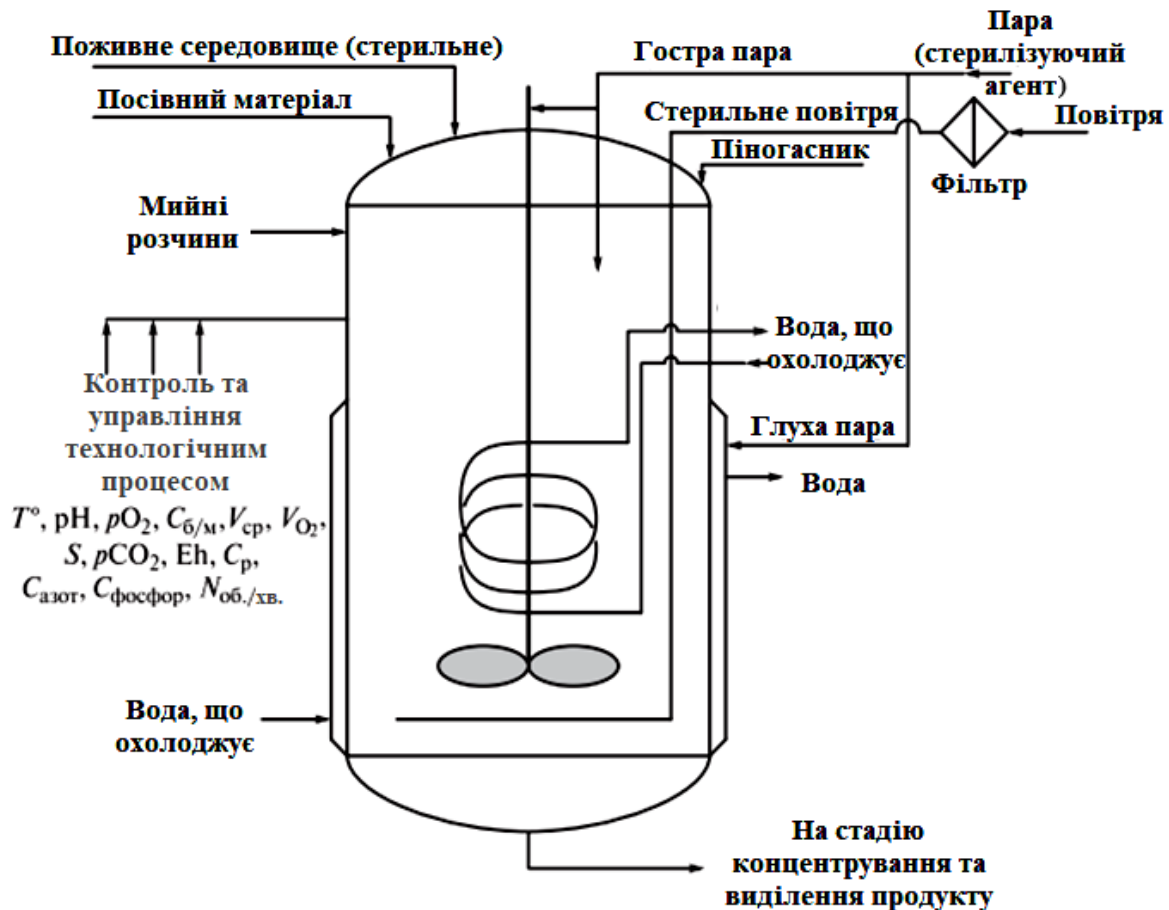


Рис. 2.4. Схема біореактора для культивування мікроорганізмів глибинним способом з подачею основних технологічних потоків і контролем параметрів ферментації

У разі існування можливості вибору між бактеріями, дріжджами чи грибами, необхідне врахування всієї сукупності факторів. Бактерії швидше зростають, можуть містити більше білка (до 80 %), але є менш технологічними – гірше фільтруються та сепаруються порівняно з дріжджами. Міцеліальні цвілеві гриби, на відміну від дріжджів та бактерій, містять значно менше нуклеїнових кислот, високий вміст яких знижує якість кормового продукту (у багатьох тварин, зокрема у птахів, високий вміст нуклеїнових кислот у кормах призводить до небажаних змін в обміні речовин, підвищеному утворенню

сечової кислоти, що виявляється в пригніченні росту молодняка або зниженні продуктивності дорослих тварин). Крім того, міцеліальні цвілеві гриби здатні утилізувати ширший ряд вуглеводів, можуть краще зростати на твердих субстратах (сіно, солома та інша рослинна сировина), що дозволяє використовувати для їх вирощування дешеві відходи сільського господарства і харчової промисловості. Волоконна структура міцелію дозволяє застосовувати дешеві методи фільтрації. Однак гриби повільно ростуть (3–7 діб), утворюють міцелій, який схильний до лізису та сильно забруднює середовище продуктами лізису та іншими токсинами. Під час промислової переробки рослинних, вуглевод- та целюлозовмісних відходів найчастіше використовують дріжджі (рідкі субстрати) та плісняві гриби (тверді рослинні субстрати).

Вибір методу культивування стадії основної ферментації. Якщо мета ферментації – отримання кормового продукту, максимально збагаченого білком мікроорганізмів, конверсію проводять в аеробних умовах. Вихід біомаси організмів у цих умовах у кілька разів вищий, ніж у анаеробних. Використовуються періодичні та безперервні ферментаційні процеси. *Безперервні* процеси більш продуктивні, стабільніші в часі, для них є меншими витрати на експлуатацію обладнання, їх легше регулювати та автоматизувати. У виробництві біомаси для кормових цілей вони використовуються у великомасштабних технологіях переробки гідролізатів деревини, торфу, лугів сульфатних, спиртів, вуглеводнів, органічних кислот, коли ферментацію можна проводити в неасептичних умовах. Якщо процес основної ферментації ведуть безперервним способом, його зазвичай організують як одноступінчастий реактор чи каскад реакторів. Каскадом реакторів може бути один апарат, розділений на секції. Багатоступеневий процес є доцільним для переробки субстратів, що важко окислюються, суміші послідовно споживаних субстратів (наприклад, гексоз і пентоз) і у разі високого залишкового вмісту субстратів при одноступінчастій ферментації.

У *періодичному* процесі використовується один або кілька паралельно та незалежно працюючих апаратів. Якщо апаратів декілька, то організується їхня робота в циклічному режимі. Велика частина з них знаходиться в режимі ферментації, а менша – в режимі миття і стерилізації.

У *великомасштабних* процесах безперервного культивування на гідролізатах деревини, торфу, лугах, барді ферментація проводиться в неасептичних або нестрого асептичних умовах, оскільки в проточних режимах під час великотоннажного виробництва складно забезпечувати стерильність протягом тривалого часу. У *маломасштабних* процесах з використанням легкоінфікованих сторонньої мікрофлорою субстратів – плодоовочевих соків, молочної сироватки та інших – необхідно підтримувати умови стерильності:

забезпечити герметизацію апаратури, введення чистої культури в апарат, захист від сторонньої мікрофлори. У цьому випадку вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу, обладнання та рівня технології є вищими, ніж у неасептичних процесах.

Технологія отримання мікробіологічного продукту залежить від того, чи використовується глибинне, глибинне гетерофазне чи поверхнєве культивування.

Глибинне культивування проводять усередині водної фази. У середу вносять посівний матеріал, органічний субстрат у розчиненому стані, розчини солей (рис. 2.4). Глибинне культивування використовується у більшості промислових біотехнологічних процесів. Методом глибинного культивування переробляються сульфітний луг, гідролізати деревини, торфу, спиртова барда, молочна сироватка та інші субстрати, що не містять твердої фази. У цих випадках як продуцент білка найчастіше використовуються дріжджі.

Типові показники глибинної ферментації та вміст найважливіших компонентів у біомасі кормових дріжджів при вирощуванні на вуглеводвмісних середовищах є наступними:

- концентрація мікроорганізмів після ферментації: 0,5–2,0 % (за асб);
- концентрація вуглеводів у вихідному середовищі: 1–5 %;
- вихід біомаси з одиниці субстрату (вуглеводів): 0,4–0,5;
- продуктивність: 1–2 кг/м³·год;
- швидкість розведення (для безперервних процесів): 0,2–0,25 год⁻¹;
- питоме споживання кисню: 0,8–1,0 кг О₂ / кг асб;
- питоме тепловиділення: 11 000–14 000 кДж / кг асб;

Склад біомаси дріжджів:

- білок: 40–58 %, у тому числі лізин:
 - 6–7 % маси білка під час вирощування на гідролізатах, сульфітних лугах;
 - 4 % маси білка під час вирощування на барді;
- вуглеводи: 11–23 %;
- ліпіди: 0,5–5,0 %;
- зола: 7–11 %;
- волога: <10 %.

Глибинне гетерофазне культивування проводять у рідкій фазі з внесенням та суспендуванням як субстратів дробленого зерна кукурудзи, картоплі, різних плодоовочевих відходів. Живлення мікроорганізмів у цьому способі може здійснюватися на поверхні субстрату, але самі мікроорганізми перебувають у товщі рідини. Як мікроорганізми-продуценти використовують дріжджі р. *Candida*, цвілеві гриби рр. *Fusarium*, *Chrysosporium*, *Aspergillus*,

Myrothecium, спільні культури бактерій р. *Cellulomonas*, що мають целюлолітичну активність, і дріжджів рр. *Saccharomyces*, *Candida*, що утилізують целюлозу, що утворюється в результаті гідролізу. В результаті ферментації отримують продукт, що містить залишки вихідної сировини та мікробну біомасу із сумарним вмістом протеїну до 20 %. Під час проведення переробки за таким методом важко організувати безперервний процес, завантажувати, перемішувати та вивантажувати вміст біореактора у присутності твердої фази, також складно забезпечити необхідні масообмінні умови в біореакторі для постачання мікроорганізмів киснем.

Поверхнєве культивування (твердофазна ферментація) проводиться у масі злегка зволоженого рослинного субстрату (вологість від 25 до 75 %). Як субстрат можуть використовуватися різні відходи – солома, тирса, виноградні вичавки, інші лігноцелюлозні матеріали, висівки, пивна дробина, подрібнена картопля тощо. Зростання мікроорганізмів відбувається на межі фаз твердий субстрат – вода – повітря; у деяких випадках – усередині частинок субстрату.

Розрізняють три варіанти твердофазної ферментації.

1) поверхнева твердофазна ферментація – «тонкий шар». Зростання мікроорганізмів відбувається у шарі субстрату 3–7 см у кюветах, деках, на стелажах у камері, де підтримуються необхідна температура та вологість повітря;

2) глибинна твердофазна ферментація в шарі, що не перемішується – «високий шар». Зростання відбувається по всій масі субстрату, що аерується;

3) твердофазна ферментація в масі субстрату, що перемішується і аерується в барабанах, які обертаються, зі шнековими мішалками та іншими пристроями, що перемішують.

Для твердофазної ферментації використовуються міцеліальні гриби, макроміцети в міцеліальній формі, змішані культури грибів та дріжджів, чисті культури дріжджів (*Endomycopsis fibuligera*, *Saccharomycopsis* spp. на крохмалевмісних субстратах). Під час переробки лігноцелюлозовмісних матеріалів методом твердофазної ферментації ефективними є дереворуйнівні гриби – ксилотрофи, які здатні розвиватися на середовищах щодо простого складу, активно синтезують гідролітичні та окисні ферменти, що беруть участь у розкладанні целюлози і лігніну, і підвищують переварювання. Гриби, що збагачують субстрати білком, базидіоміцети, вони відносяться до родів *Pleurotus* (глива – плеврот черепчастий), *Coriolus* (коріол), *Panus* (*Lentinus*, пилолист), *Phanerochaete* (біла гниль), *Tyromyces* (тироміцес), *Schizophyllum* (щелелист) є добре відомими деструкторами деревини. Для збільшення ступеню розщеплення лігноцелюлозних матеріалів та прискорення росту грибів часто вносять легкозасвоювані та дешеві джерела вуглецевого харчування,

наприклад буряковий жом або картопляну мезгу, або передобробляють лігноцелюлозні субстрати фізичними, фізико-хімічними, хімічними або ферментативними методами.

Типові характеристики субстрату та умови твердофазної ферментації під час переробки соломи:

- розмір частинок соломи до 30–50 мм;
- вологість 52–65 %;
- щільність субстрату 520–750 кг/м³;
- теплоємність субстрату 1,8–2,5 кДж/кг·К;
- теплопровідність субстрату 0,13–0,16 Вт/м·К;
- температуропровідність субстрату $(8,8–10,2) \cdot 10^{-8}$ м²/с;
- товщина ферментованого шару в кюветі 50–100 мм (при товщині > 50 мм необхідна організація тепловідведення з кювет) – максимальне тепловиділення – 2400 Вт/м³;
- температура 25–28 °С;
- рН 5,0–5,5;
- концентрація посівного матеріалу 5–15 %;
- тривалість ферментації 3–20 діб.

Під час збагачення білком соломи, пшеничних і кукурудзяних висівок з використанням міцеліальних грибів *Fusarium* spp., *Acremonium* spp., *Allescheria* spp., *Trichosporon capitatum*, *Aspergillus japonicus* в результаті твердофазної ферментації методом «тонкого шару» одержують продукт з вмістом білка до 16–22% (за сухою масою). Під час ферментації пшеничної соломи методом «високого шару» без перемішування продукт містить до 14 % білка при використанні міцеліальних грибів і до 12 % білка під час ферментації з базидіальними макроміцетами. При використанні за тих же умов необробленої тирси отримують продукт із вмістом білка 6–8 %. Ферментація соломи, тріски призводить не тільки до збільшення вмісту білка в кормовій масі, але і збільшує доступність залишків целюлози та геміцелюлози для перетравлення ферментами худоби.

Під час вирощування базидіальних грибів на солоній з додаванням 10–30 % (від маси сухого субстрату) бурякового жому або картопляної мезги вміст білка в переробленому субстраті збільшується з 2,8 до 9,0–12,0 %. Під час твердофазної ферментації відходів крохмалю (картопляних, бананових, маніокових) вміст білка підвищується з 2,5–6,5 до 17–20 %.

Переваги твердофазної ферментації:

- відносна простота середовища;

– часто досягається велика концентрація сухих речовин, менші енергетичні та теплові витрати на ферментацію (у 3–7 разів), на концентрування продукту в порівнянні з глибинним культивуванням;

– незначна кількість води, яка використовується в процесі;

– деякі процеси під час твердофазної ферментації перетікають інтенсивніше, ніж у глибинної культури;

– можливість довго зберігати та легко транспортувати висушений кормовий продукт.

Недоліки твердофазної ферментації:

– трудовитрати і займані виробничі площі при поверхневому культивуванні більше, ніж при глибинному;

– істотно складніше механізувати процес, стерилізувати тверді субстрати і підтримувати асептичні умови, відводити тепло, що виділяється, забезпечувати ферментацію киснем, регулювати і контролювати процес;

– труднощі з організацією безперервного культивування, із забезпеченням стандартного якості одержуваних продуктів.

Організація асептичного процесу. Субстрати, середовища та обладнання в асептичному процесі мають бути піддані стерилізації. У технологічному процесі застосовуються різні способи стерилізації.

Теплова стерилізація. Використовується найбільш широко для стерилізації обладнання та поживних середовищ.

Сухим жаром стерилізують малогабаритне, переносне, допоміжне обладнання (фільтри, пробовідбірники, лабораторний посуд тощо) при 160–180 °С протягом 2–3 год.

Стерилізацію під тиском сухою (перегрітою) парою застосовують рідко через низьку теплопровідність пари та ненадійність стерилізації штуцерів, відводів, ущільнень тощо.

Найбільш часто застосовують *стерилізацію під тиском гострим або насиченим паром*. Звичайні режими для стерилізації обладнання: надлишковий тиск 0,07–0,10 МПа при відповідній температурі пари 115–120 °С протягом 45–120 хв. Термолабільні сполуки (піногасник, сечовина) стерилізують окремо при надлишковому тиску 0,05 МПа протягом 30 хв.

Для *періодичного* процесу з використанням методу *глибинного* культивування стерилізація проводиться в наступній послідовності:

– витіснення (травлення) повітря з обладнання і трубопроводів парою, що подається,

– витримування обладнання з парою в режимі стерилізації,

– витіснення (травлення) пари до його конденсації стерильним повітрям.

Якщо цього зробити вчасно, то при охолодженні пар *сконденсується*, утворюється *вакуум*. Це може призвести до потрапляння в апарат мікрофлори ззовні, а якщо ємність із тонкою оболонкою, то вона може бути зім'ятою. Якщо процес безперервний, то виникають труднощі зі стерилізацією потоків середовищ, що надходять. Стерилізацію великих кількостей поживних середовищ на виробництві найчастіше проводять на установці безперервної стерилізації (УБС, рис. 2.5).

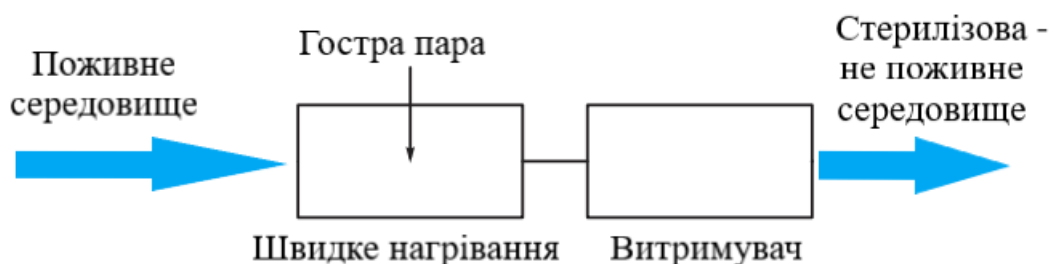


Рис. 2.5. Стерилізація поживних середовищ з використанням УБС

При однаковому критерії стерилізації режими з більшою температурою і меншою витримкою забезпечують кращу безпеку поживного середовища, ніж при більшій витримці, але меншій температурі. Тому важливо швидко нагріти поживне середовище до температури стерилізації (при нагріванні гострою парою) і витримати її протягом потрібного часу. Трубчастий витримувач витіснявального типу забезпечує однаковий час витримання всього об'єму середовища при необхідній температурі.

При проведенні ферментаційного процесу застосовуються також заходи для виключення потрапляння сторонньої мікрофлори всередину апарату:

- використовується мінімальна кількість штуцерів, труб, з'єднань;
- стерилізуються ущільнення мішалок та контрольно-вимірвальні прилади;
- для запобігання попадання інфекції зі зворотним струмом газу, що відходить з ферментера, на виході встановлюються пастки і зворотні клапани;
- ферментацію ведуть за невеликого надлишкового тиску.

Стерилізація (пастеризація) нагріванням при атмосферному тиску використовується для процесів, що не потребують суворих асептичних умов (при підготовці до ферментації спиртової барди, молочної сироватки, твердих субстратів, концентрованих розчинів мінеральних солей, при тепловій обробці ферментованих продуктів).

Стерилізація фільтруванням. Використовується для стерилізації повітря, що подається.

Мікрофільтрація – для стерилізації термолабільних компонентів

поживних середовищ, титруючих агентів (навіть у концентрованому розчині NH_3 можуть бути життєздатні спори мікроорганізмів). Самі фільтри попередньо стерилізують тепловим чи хімічним способом.

Хімічна стерилізація. Використовується обробка обладнання антисептиками, формальдегідом, NaOH , H_2O_2 (має високу вартість, що викликає корозію), етанолом. Хімічними реагентами стерилізують фільтри (формальдегід), датчики (етанолом), обладнання для виділення і концентрування продукту (розчином з активним хлором і NaOH). Хімічні реагенти повинні легко вимиватися, не забруднювати довкілля, бути досить дешевими.

Стерилізація опроміненням – γ -променями, мікрохвильовим випромінюванням. Стерилізація γ -опроміненням використовується для термолабільних твердих субстратів (торф та інші носії) при приготуванні товарних форм біопрепаратів (з азотфіксуючими мікроорганізмами та ін.).

Підготовка поживних середовищ. Відходи, що збагачуються кормовим білком, являють собою сировину комплексного складу, яка може містити органічні та мінеральні компоненти – джерела вуглецю, азоту, фосфору, сірки, вітаміни, ростові фактори, мікроелементи. Однак для отримання продукту необхідної якості субстрат повинен мати певну концентрацію джерела вуглецю, співвідношення $\text{C} : \text{N} : \text{P}$ (впливає на вихід біомаси, вміст білка, ліпідів, фосfolіпідів), ступінь чистоти, стерильність, обмежений вміст токсичних речовин – важких металів та ін. Тому зазвичай поживне середовище готують з органічного субстрату та солей. Як правило, солі служать джерелами N , P , Mg , K , S , Na , Ca , мікроелементів Fe , Zn , Mn та ін. Крім Na і Ca , а іноді і мікроелементів, в поживні середовища додають всі перераховані елементи. Na , Ca і мікроелементи можуть утримуватися в необхідних кількостях у природній воді і переробних відходах.

Азот додається у вигляді NH_4^+ (NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4OH) або NH_3 . Нітрати використовуються рідше, так як мікроорганізмами азот нітратів засвоюється після відновлення його в амонійну та амінну форми, що вимагає додаткових витрат енергії та знижує вихід продукту.

Фосфор вводиться у ферментер зазвичай у вигляді H_3PO_4 або солей фосфорної кислоти: аммофосу, подвійного суперфосфату та ін. Суперфосфат – дешеве джерело фосфору, проте він містить численні сполуки фтору, який несприятливо діє на мікроорганізми і потрапляє в продукт, тому на підприємствах, як правило, контролюють рівень F^- в сировині та продукті.

Калій використовується у вигляді K_2SO_4 , KCl , іноді KOH . Магній – у формі MgSO_4 . Кальцій – як CaCO_3 . Карбонат кальцію часто служить буферним агентом підтримки pH середовища в діапазоні нейтральних значень.

Мікроелементи вводяться у вигляді сульфатів. Хлориди використовуються рідко через кородуючу дію іонів Cl⁻. Інші елементи присутні як домішки до основних мінеральних солей.

Як джерело мінерального живлення під час переробки відходів зазвичай використовуються дешеві добрива невисокої якості (70 % основної речовини). Однак у цьому випадку можуть у великій кількості з'являтися шлами (солі Ca, Mg), які впливають на технологічні апарати (засмічують трубопроводи), тому шлами необхідно відокремлювати від розчину (зазвичай безпосередньо в ємностях, де готують розчини солей) і надалі вивозити у місця складування чи утилізувати.

Як правило, поживні солі вводяться в середовище культивування з надлишком (до 1,5–2,0 разів).

Титруючі агенти та піногасник. Піногасники (пропінол Б-400 (суміш поліоксипропіленгліколевих етерів н-бутилового спирту), кремнійорганічні сполуки, жирні кислоти, олії та ін) зазвичай додаються у вигляді емульсії та стерилізуються окремо. Якщо ферментація йде із споживанням азоту як NH₄⁺, то NH₃ входить у клітинне речовина, а H⁺ виділяється у середовище, відбувається її підкислення. Підкислення можливе також за умови виділення органічних кислот. У цьому випадку середовище нейтралізують додаванням NH₄OH, рідше NaOH, KOH. Використовуються також буферні реагенти (CaCO₃), що додаються у вихідне середовище культивування. При використанні NH₄OH у середовищі зростає концентрація азоту, змінюється співвідношення P : N, що може позначитися на зростанні мікробної біомаси та біосинтезі цільової речовини. Під час твердофазної ферментації складно підтримувати необхідний рН усередині твердої фази. В цьому випадку як джерело азоту можуть використовуватися суміші амонійних солей та сечовини.

Якщо в ході ферментації спостерігається підлужування – під час використання нітратів або сечовини (NH₂)₂CO в якості джерела азоту, органічних кислот в якості вуглецевого субстрату, то зазвичай середовище підтитрують H₂SO₄, H₃PO₄.

Для зниження обсягу стоків та економії поживних солей можна використовувати рециклінг культуральної рідини на стадію ферментації. Однак через незбалансоване споживання катіонів і аніонів частина з них *накопичується* в середовищі культивування. Одночасно накопичуються і продукти мікробного метаболізму. При підвищених концентраціях метаболітів може спостерігатись *інгібування* біосинтезу. Для вирішення цієї проблеми з рідини, що підлягає рециклінгу, необхідно видаляти надлишкові іони, інгібітори росту та біосинтезу. Однак зазвичай це складний та енергоємний процес. Крім того, під час рециклінгу потрібно стерилізувати культуральну

рідину, що повертається на стадію ферментації, в ній накопичуються токсичні речовини, зокрема іони важких металів. У такому разі доцільно використовувати сировину вищої якості, що призводить до збільшення вартості кінцевого продукту. Таким чином, вирішення завдання зниження обсягу стоків та економії поживних солей без збільшення сумарних витрат веде до погіршення якості цільового продукту.

Для використання в технологічному циклі окремо готують розчини кожної солі з підвищеною концентрацією – так легше визначити концентрацію солі в розчині, концентровані розчини легше зберігати і простіше уникнути небажаних реакцій між солями (наприклад, під час змішування сульфатів мікроелементів з фосфатами амонію або калію) в осад можуть випадати фосфати мікроелементів). Якщо компоненти поживних середовищ взаємодіють між собою при тепловій стерилізації, то їх необхідно стерилізувати окремо.

Поганорозчинні солі необхідно підкислювати. Однак робота з підкисленими розчинами вимагає використання обладнання з кислотостійких марок сталей, що мають вищу вартість. Можна підвищити рН, якщо поживні солі швидко вдається швидко перекачувати у ферментер після приготування, але в цьому випадку зростають трудовитрати.

У технологічному процесі є важливим забезпечення сталості концентрацій мінеральних компонентів у поживному середовищі. Якщо спостерігаються великі коливання концентрацій солей у безперервному процесі, то мікроорганізми мають постійно адаптуватися до цих змін, що погіршує їх зростання та технологічні показники процесу.

Приготування посівного матеріалу. Приготування посівного матеріалу передбачає вирощування чистої культури продуцента послідовно від штаму у пробірці до посівного апарату (інокулятора).

Культури мікроорганізмів зберігають у життєздатному стані на агаризованих середовищах (не більше 3 міс). Більше тривале зберігання можливе в сухому вигляді (спори) на природному носії (кварцовий пісок, висушене зерно); у ліофільно-висушеному стані (3-5 років).

Розмноження посівного матеріалу для глибинного культивування проводять у наступній послідовності: пробірка → гойдалкові колби → первинний інокулятор → вторинний інокулятор → ферментер.

Розмноження посівного матеріалу для поверхневої культури проводять у наступній послідовності: чашка Петрі → кювета → противень → промислова ферментація.

Такий процес поступового розмноження полегшує забезпечення стерильних умов і домінування продуценту в популяції у разі порушення стерильності на стадії промислової ферментації, дозволяє своєчасно виявляти

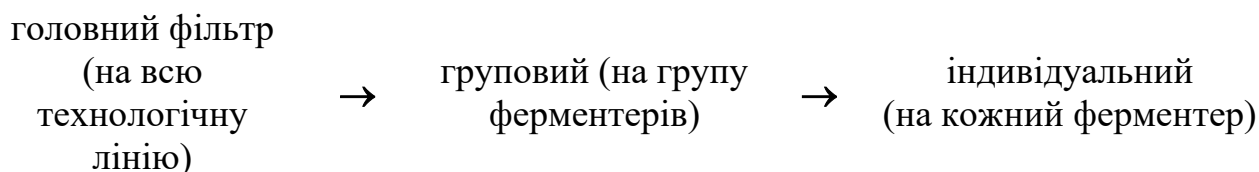
фагові інфекції, падіння активності продуцента. Таким чином, економиться сировина, знижується частка бракованих ферментацій.

Зазвичай співвідношення робочих обсягів апаратів (площ кювет) зростають у процесі розмноження як 1 : 10 – 1 : 20 (т. е. 5–10 % посівного матеріалу). Поширені об'єми ферментерів: $0,63 \text{ м}^3 \rightarrow 6,3 \text{ м}^3 \rightarrow 63 \text{ м}^3$ ($2\pi\tau = 6,3\tau$).

Промисловий ферментер можна засіяти відразу з колби, але це є нерациональним, так як культура буде довго зростати у великому об'ємі, що призведе до зниження продуктивності основного обладнання, зростання експлуатаційних витрат, більшої ймовірності інфікування. Для неасептичних процесів при низькій дозі засіву культура може витіснитись дикою мікрофлорою.

Забезпечення аеробного ферментаційного процесу киснем. Підготовка повітря у промислових умовах включає його компримування (стиснення), очищення та стерилізацію (для асептичних процесів). Зазвичай ступінь утилізації кисню з повітря 1–20 %, тобто в кращому випадку використовується 4 % повітря, тому необхідно прокачувати значну кількість повітря через шар рідини (при глибинному культивуванні) і необхідний потужний компресор, якщо для аерації рідини ферментер використовується барботаж. В асептичній ферментації на виході з біореактора надлишковий тиск повітря має становити близько 0,03 МПа з метою унеможливлення потрапляння інфекції ззовні. На вході тиск підтримується в діапазоні 0,2–0,3 МПа.

На великих підприємствах повітря забирають з позначки близько 40 м, де воно більш чисте, ставлять фільтри грубого очищення від пилу. При подальшому компримуванні використовують або поршневі компресори, або турбокомпресори. При використанні *поршневих* компресорів стискання повітря призводить до підвищення температури до 150–160 °С. Повітря при цьому забруднюється олією, тому після компресора ставлять олієвловлювачі та фільтри. *Турбокомпресори* є більш продуктивними, ніж поршневі, нагрівають повітря до 220 °С, але вони вибухонебезпечні. Після компресорів повітря охолоджується до 60–100 °С (при цьому може конденсуватися надлишкова волога) і проходить через фільтри (в асептичних виробництвах) за схемою:



Головний фільтр має велику поверхню, як робочий матеріал у ньому використовується активоване вугілля. В індивідуальних фільтрах як фільтруючий матеріал використовуються метал, кераміка, пористі пластини,

тканина Петрянова. Після кожного апарату може бути передбачений фільтр для виключення викидів мікробних клітин і твердих частинок в атмосферу.

Підвищення забезпечення киснем потрібне в наступних випадках:

– при зростанні на субстратах з низьким вмістом кисню в молекулі доступного субстрату (н-алкани, CH_4 , етанол, метанол, жири); у цьому випадку питома кількість кисню, що споживається при накопиченні одиниці біомаси, висока;

– при ферментації на середовищі з високою в'язкістю, наприклад, якщо утворюється міцелій або виділяються полісахариди у середовище культивування (складно забезпечити високий об'ємний коефіцієнт масопереносу);

– при зростанні культур, схильних утворювати агрегати та флокули (складно забезпечити високий об'ємний коефіцієнт масопереносу та доступ кисню всередину агрегатів);

– при іммобілізації мікроорганізмів на поверхні твердих носіїв і середовищ (зростання і біосинтез лімітується перенесенням кисню через пограничний шар між рідкою і твердою фазами).

Для *підвищення інтенсивності масопереносу кисню в ферментер* може використовуватися ряд *способів*.

1. *Удосконалення конструкції перемішуючого пристрою* та збільшення швидкості обертів мішалки (при глибинному та глибинному гетерофазному культивуванні). При отриманні продуктів, збагачених кормовим мікробним білком, конструкція біореактора з барботажем повітря без мішалки застосовується рідко, оскільки не дозволяє забезпечити необхідні масообмінні характеристики в біореакторі.

Конструкція ферментера з барботажем з *ерліфтним пристроєм* застосовується для не дуже інтенсивних процесів з відносно невисоким вмістом конвертованого субстрату в середовищі, наприклад, при вирощуванні дріжджів на гідролізатах деревини (з вмістом вуглеводів у вихідному суслі 12–16 г/л). Перевага цього способу – простота конструкції та менші складнощі із забезпеченням асептичних умов. Промислові ферментери з ерліфтом, що використовуються у виробництві кормових дріжджів на гідролізатах деревини методом проточного культивування, забезпечують швидкість масообміну не більше $2,0 \text{ кг O}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, питому продуктивність до $1,8 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ (за сухою масою дріжджів при швидкості розведення середовища $0,25 \text{ год}^{-1}$) і витрата електроенергії $0,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ абс.сухих дріжджів.

У більшості процесів використовується *барботаж із мішалкою*. Одним з найбільш інтенсивних способів забезпечення киснем є перемішування за допомогою *самовсмоктувальної мішалки* (турбоежектом), але він

практикується тільки для неасептичних процесів – у виробництві білково-вітамінних концентратів на н-алканах, при переробці різних відходів сільського господарства та тваринництва, що не містять твердих часточок.

Струменевий ферментер і ферментер з інжекцією не знайшли широкого застосування через наявність виносного циркуляційного контуру.

2. *Збільшення подачі повітря* в ферментер. Для цього способу характерні підвищені витрати на стерилізацію, компримування і очищення повітря, а для сильно пінних середовищ – збільшення витрат на піногашення. Збільшення витрати повітря через барботер без перемішування середовища механічною мішалкою не дозволяє досягти високих значень об'ємного коефіцієнту масопереносу.

3. *Підвищення робочого тиску*. Зі збільшенням тиску розчинність кисню зростає, зростає рушійна сила процесу. Метод використовується в апаратах колонної конструкції, аналогічно тому, як це застосовується в шахтних і колонних аеротенках.

4. *Збагачення повітря киснем*. У технології біосинтезу і переробки відходів метод практично не використовується, оскільки вимагає істотних витрат на отримання чистого кисню або збагачення повітря киснем. Розроблені останнім часом напівпроникні газорозділювальні мембрани дозволяють створювати відносно доступні автономні установки, які можуть бути використані з метою збагачення повітря киснем.

5. *Зменшення температури культивування* – використання психрофільних штамів. Зі зниженням температури розчинність кисню зростає. Однак цей шлях є малоефективним, тому що рідко вдається отримати психрофільний штам з необхідними технологічними характеристиками, і, крім того, зростають витрати на охолодження ферментера. Зі збільшенням інтенсивності масообміну з ферментаційного середовища швидше виводиться CO_2 . Однак зазвичай CO_2 знаходиться в середовищі в таких концентраціях, що не заважає зростанню.

Інші особливості організації ферментаційного процесу

Об'єми промислових ферментерів (для глибинного культивування) залежно від кількості продукції становлять від 0,5 до 450 м³. Найбільш поширеним великогабаритним апаратом є апарат із загальним об'ємом близько 100 м³, оскільки його ще можна перевезти залізницею. При більшому об'ємі монтаж ферментера ведуть в промислових приміщеннях.

Матеріали для ферментерів: нержавіюча сталь. Звичайні марки сталі, чорний чавун, емальований чавун не використовуються.

Верхня кришка ферментера зазвичай приварюється (на відміну від хімічних апаратів) – задля забезпечення герметичності (фланцеві з'єднання не

забезпечують герметичності, оскільки прокладки пробиваються, особливо під тиском під час стерилізації). У ферментері є люк (монтується на болтах), через який можна потрапити всередину для монтажу теплообмінника, барботера, мішалки, чищення поверхонь всередині ферментера.

Порядок запуску ферментера у асептичних умовах

1. Здійснюють *стерилізацію* апарату. Для цього заливають воду, подають пару або в рубашку, або в ферментер, а також в обв'язку. Витримують кілька годин, потім спорожняють, продувають стерильним повітрям.

2. Завантажують стерильне *поживне середовище* (воду, джерела вуглецю, макро- та мікроелементи).

3. Встановлюють *робочу температуру* (26–55 °С) подачею холодної води в сорочку.

4. Вносять стерильний *посівний матеріал*.

5. Починають подавати *чисте повітря* (з температурою не вище 60–90 °С). При підвищенні температури повітря спостерігається підвищений бризковиніс (до 50 % середовища за ферментацію). Варіант повернення віднесених поживних речовин не передбачається через необхідність збереження асептичних умов.

Охолодження ферментера. Виділення тепла в процесах біосинтезу і перемішування призводить до нагрівання ферментаційного середовища, тому, як правило, потрібно охолодження ферментера. На більшості ферментерів є рубашки для нагрівальних та охолоджуючих агентів. Якщо поверхні теплообміну не вистачає, то доцільним є монтаж додаткових змійовиків. Часто використовують зовнішнє зрошення. Влітку можуть виникнути проблеми з охолодженням, так як температура холодної води (у місці водозабору) зростає, різниця температур по обидва боки теплообмінної поверхні зменшується і відповідно знижується швидкість тепловідведення, у зв'язку з цим можливий перегрів ферментаційного середовища з перевищенням температури вище оптимальної на 8–10 °С. У таких випадках потрібно заохолоджувати воду або використовувати як хладоагент розсол (розчин CaCl_2). Витрати на охолодження ферментера у разі різко підвищуються.

У технологічній схемі мають бути передбачені *резервуари для проміжних потоків* – стерильних середовищ та ферментованого середовища. Об'єм і кількість резервуарів розраховуються виходячи з технологічного потоку і допустимих термінів зберігання середовища в резервуарі.

Якщо культуральну рідину потрібно довго зберігати в проміжних ємностях, її заохолоджують (до 10 °С), для запобігання розвитку сторонньої мікрофлори.

Якщо з будь-якої причини спостерігається низька активність продуценту

(низька кінцева концентрація продукту), то така ферментація є бракованою. В цьому випадку доводиться весь вміст ферментера зливати в трап і далі на очисні споруди. Зазвичай частка таких ферментацій – трохи більше кількох відсотків.

Чищення та миття обладнання. Можна здійснювати чищення та миття паром, проте це не зовсім зручний метод – поверхні складно очистити. Найчастіше використовується миття з хімічними засобами. Вони мають бути вибірковими, інертними до матеріалу обладнання. Часто для миття використовується луг, сода з концентрацією 10–15 %, потім обладнання та комунікації промиваються водою. Відпрацьований розчин за необхідності стерилізується. У технологічній схемі має бути передбачена можливість чищення, миття та дезінфекції всіх апаратів та трубопроводів.

2.1.2. Виділення та концентрування біомаси та білкових речовин

При переробці рідких відходів в кормові продукти глибинним культуруванням біомасу одноклітинних організмів відокремлюють від ферментованого середовища (безклітинної, культуральної рідини) і концентрують різними методами або згущують і сушать разом з залишками субстрату і продуктами життєдіяльності. При гетерофазному глибинному культивуванні біомасу виділяють разом із твердою фазою.

Для виділення клітин мікроорганізмів з рідкого середовища можуть використовуватися різні методи.

Декантація (седиментація), гравітаційне ущільнення. На відміну від процесів біологічного очищення стічних вод, в яких активний мул осаджується у вторинних відстійниках або на стадії попереднього ущільнення активного мулу, в технологіях мікробіологічного синтезу ці способи застосовуються рідко через низьку продуктивність, оскільки щільність мікроорганізмів близька до густини середовища культивування. Іноді для прискорення осадження біомаси в середовище додають коагулянти і флокулянти, що сприяють утворенню великих флокул мікроорганізмів та їх осадженню. Згущення активного мулу, призначеного для використання в якості кормової добавки, сприяє введенню мінеральних речовин з коагулюючими властивостями, кормових дріжджів р. *Candida*, біофлокулянтів, одержуваних модифікацією активного мулу. Додавання дріжджів сприяє агрегуванню пластівців і збільшення швидкості їх осадження. Аналогічний варіант, але з добавками активного мулу, можливий і при виділенні дріжджів із відпрацьованої культуральної рідини. Щільний осад утворюється при високих концентраціях мінерального коагулянту при

спільному відстоюванні суспензії активного мулу і дріжджів у гравітаційному полі.

Декантація та ущільнення дозволяють зменшити обсяг суспензії мікроорганізмів, що призводить до зниження витрат на наступних стадіях переробки. Осад після відстоювання можна направити в сепаратор для додаткового згущення мікробної біомаси, а згущену біомасу подати в сушилку.

Фільтрація. Використовується досить широко на кінцевій стадії згущення виділення великих міцеліальних форм мікроорганізмів, дріжджів-сахароміцетів. Застосовуються барабанні та стрічкові преси (при фільтрації кормового продукту, що містить тверду фазу), фільтр-преси, нутч-фільтри (при малому обсязі рідини).

Фільтрація з наливним шаром можлива для виділення мікроорганізмів спільно з залишками твердої фази субстрату після гетерофазного культивування. Як наливний шар виступає тверда фаза переробленого субстрату. Перед фільтрацією суспензії мікробних клітин можливе додавання деревної тирси несмолистих порід дерев, деревного борошна, діатоміту, цеолітів, інших присадкових матеріалів – інертних речовин, що легко фільтруються, які створюють великопористу структуру осаду. Цей прийом покращує фільтрованість і одночасно може бути використаний для балансування кормових властивостей одержуваних продуктів.

Бактеріальні мікроорганізми мають малі розміри і для них звичайні фільтри є непридатними. У цьому випадку можна використовувати *мікрофільтрацію* та *ультрафільтрацію*.

У всіх методах фільтрації проблемою є швидке забивання фільтрів і мембран, що призводить до різкого падіння (у десятки разів) їх продуктивності. Доводиться прикладати великі зусилля для підтримки задовільних робочих характеристик фільтрів, багаторазово збільшувати площу фільтруючої поверхні та габарити установок. Для підвищення швидкості фільтрації суспензію мікроорганізмів додають *коагулянти* або *флокулянти*, нагрівають її. Попадання в суспензію смолистих, слизових та колоїдних домішок, олій та жирів погіршує фільтрованість суспензії.

Центрифугування та *сепарація* широко використовуються на біотехнологічних підприємствах на першому етапі концентрування мікроорганізмів, якщо ферментаційне середовище не містить залишків твердої фази, абразивних домішок. Переваги цього методу: простота, економічність, можливість автоматизації. Недолік – часта зупинка центрифуг та сепараторів для миття через наявність у суспензії частинок піску, залишків твердої фази

субстрату тощо. Великі мікроорганізми (дріжджі) відокремлюються легко, бактерії – складніші. Для їхнього відділення необхідно збільшувати кількість оборотів, діаметр ротора, що веде до різкого збільшення витрат енергії. У промисловості для згущення біомаси мікроорганізмів найбільшого поширення набули *тарілчасті сепаратори*.

Варіанти організації сепарації: одноступінчаста, багатоступінчаста (зазвичай двоступінчаста). Між ступенями сепарації можливе нагрівання рідини, що сепарується, з біомасою. Це призводить до зменшення в'язкості середовища і, отже, до більшої продуктивності сепаратора, а також збільшення ступеня відмивання клітин мікроорганізмів від залишкових домішок, наприклад крапель жиру. Після одноступінчастої сепарації концентрація мікроорганізмів підвищується з 1–2 до 3–6 %. Після двоступінчастої – до 15 %.

У ході сепарації невелика частина мікроорганізмів може нестись з потоком освітленої культуральної рідини. Втрати дріжджів після сепарації внаслідок винесення зазвичай не перевищують 1–2 % від усієї кількості біомаси. Бактерії гірше сепаруються через свої розміри, що призводить до підвищеного винесення біомаси з потоком освітленої культуральної рідини зі стадії сепарації. У цьому випадку, якщо в схемі не передбачений рециклінг відпрацьованої культуральної рідини на ферментацію, необхідні додаткові сепаратори для її доочищення.

Флотація. Використовується на першій стадії згущення біомаси. Переваги флотаційного згущення – простота апаратурного оформлення, незначна тривалість. Розподіл йде в односекційних чи багатосекційних флотаторах. Флотація може відбуватися у ферментері при утворенні піни. Піна містить підвищену концентрацію мікроорганізмів. Зміст біомаси в пінному шарі досягає 30–100 г/л (за сухими речовинами).

Флотатори використовуються у виробництві дріжджів на гідролізатах деревини. У цьому виробництві кінцева концентрація дріжджів у ферментаційному середовищі невисока (не більше 8–10 г/л). При невисокій концентрації біомаси на першій стадії виділення раціональніше використовувати флотаційний метод, а не сепарацію. Як правило, відділення чи концентрування мікроорганізмів не досягається лише флотацією. Зазвичай після флотації передбачено сепарацію.

Бактеріальні мікроорганізми погано флотують, дріжджі – краще. Для підвищення флотованості частинок і клітин у середу можна вводити додаткові реагенти (ПАР та ін).

У промисловості найбільш широко застосовують спосіб флотації під

натиском (див. рис. 2.6).

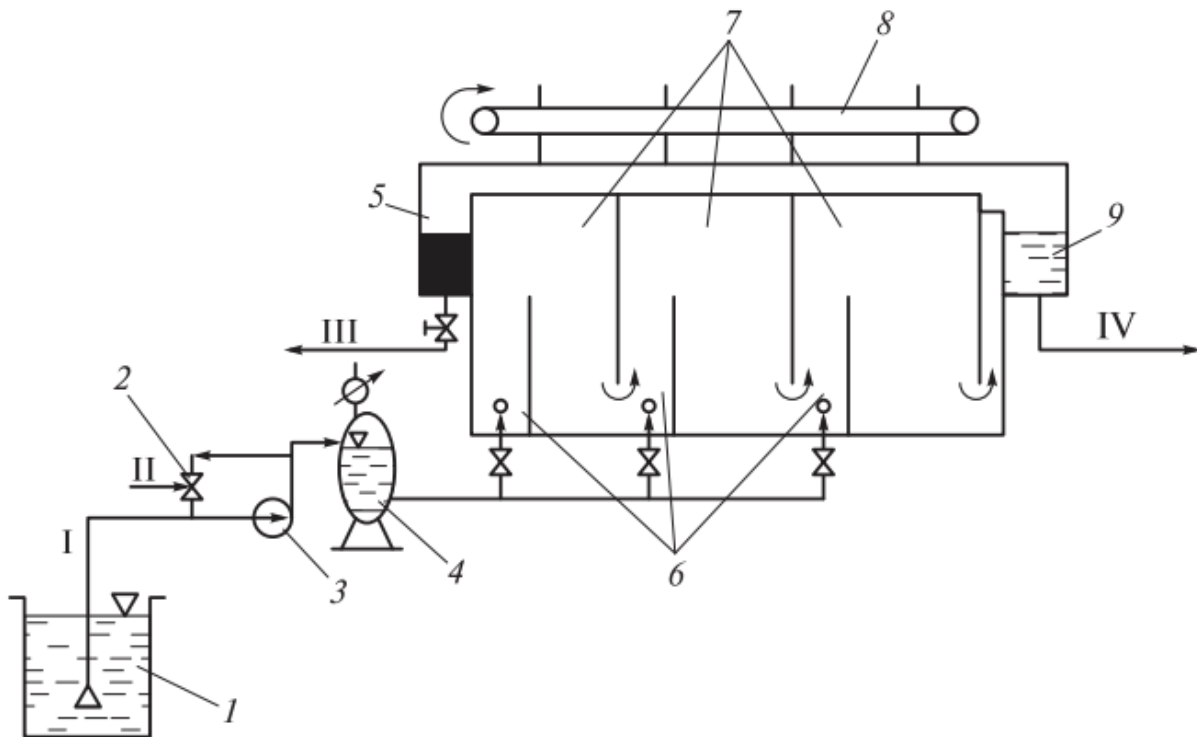


Рис. 2.6. Принципова схема флотаційної установки для ущільнення надлишкового активного мулу: 1 – ємність вихідної мулової суміші; 2 – ежектор повітря; 3 – насос подачі мулової суміші; 4 – сатуратор; 5 – мулозборний лоток; 6 – подача мулової суміші, насиченої повітрям; 7 – флотаційні камери; 8 – скребок для збору мулу, що випливає; 9 – камера збору освітленої води; I – мулова суміш; II – повітря; III – ущільнений мул; IV – освітлена вода

У цьому випадку мулову рідину насичують повітрям у сатураторі під тиском 0,25–0,65 МПа протягом 2–6 хв з одночасним перемішуванням або без циркуляційним насосом. Повітря подають у сатуратор або напірний трубопровід компресором або шляхом ежекції в напірний трубопровід. Після виходу з сатуратора мулова рідина надходить у флотаційну камеру, в якій при скиданні тиску до атмосферного виділяються дрібні бульбашки повітря. Вони прикріплюються до частинок мулу та піднімаються з ними на поверхню. Пінний шар сфлотованого активного мулу, що утворився, механічно видаляється через илоприймач.

Постферментаційне середовище з мікроорганізмами насичують під тиском 0,25–0,65 МПа повітрям у сатураторі протягом кількох хвилин. При зниженні тиску до атмосферного у флотаційній камері починають виділятися

дрібні бульбашки повітря, які флотують частинки, що містяться у воді. Пінний шар, що утворився, сфлотованої біомаси механічно видаляється з камери в приймач суспензії.

Недолік флотації – високий винос нефлотованих клітин мікроорганізмів (0,5–1,5 г/л) та втрати біомаси.

Електрофлотація, під час якої бульбашки газу утворюються внаслідок електролізу води, також може бути використана для згущення мікробної біомаси. Під час обробки суспензії бактерій електрофлотацією ступінь згущення становить 3–5 при вихідній концентрації 0,6–1,0 % абсолютно сухих речовин, а енерговитрати – близько 1–2 кВт·год на 1 м³ вихідної суспензії. Найбільший вплив на процес електрофлотації має щільність струму.

Коагуляція та *флокуляція* застосовуються для поліпшення седиментаційних, фільтраційних та флотаційних характеристик клітин мікроорганізмів. Можливі реагентні (хімічні), безреагентні (фізичні) та комплексні (хімічні та фізичні) методи обробки.

При зниженні або збільшенні рН під впливом підвищеної температури або хімічних речовин (електролітів-коагулянтів, флокулянтів, ПАВ) властивості поверхні клітин модифікуються, вони агрегують, утворюють пластівці, флокули. Повільне і рівномірне перемішування суспензії збільшує об'єм, масу і здатність до злипання агрегатів, що утворюються. Такі агрегати легше осідають і відокремлюються від води, питомий опір їх при фільтрації нижче, флотованість підвищується. Далі їх або відфільтровують, або сепарують, або флотують і відокремлюють іншими методами.

При отриманні кормового і тим більше харчового продукту на основі мікробної біомаси реагентна обробка не має інгібувати зростання мікроорганізмів при введенні в ферментер, реагенти, що додаються, повинні діяти ефективно в невеликих кількостях, бути нетоксичними або легко відмиватися від клітин.

Седиментаційні характеристики, сепарованість мікробної суспензії та здатність до зневоднення можна суттєво покращити попереднім *нагріванням* до 65–85 °С та *термореагентною обробкою*, при яких відбувається денатурація білкових речовин та клітинних структур.

Коагуляція використовується і у випадках, коли цільовий продукт – позаклітинні метаболіти, а не клітини мікроорганізмів. *Теплова коагуляція* застосовується, наприклад, технології отримання білка з клітинного соку рослин. Недолік теплової коагуляції – під час впливу високої температури може спостерігатися лізис (плазмоліз) клітин, що призводить до втрати біологічно

активних речовин.

Вакуум-випарювання використовується на кінцевих стадіях концентрування продукту. Режими вакуум-випарки вибирають такі, щоб згустити продукт, видалити воду, зберігши якість продукту, а іноді й життєздатність клітин (у виробництві пекарських дріжджів, різних біопрепаратів на основі живих клітин мікроорганізмів). Тому температура упарювання має бути не вищою за 90 °С, а якщо потрібно зберегти життєздатність мікроорганізмів, то ще менше і відповідно за умови використання глибшого вакууму. Вміст сухих речовин у випареній після вакуум-випарки суспензії становить 20–30 %.

На великотоннажних підприємствах поширені багатокорпусні вакуум-випарні установки (ВВУ) з 2–4 ступенями з різним тиском та температурою. У цьому випадку більш раціонально використовується тепло, необхідне для випаровування вологи. Пара використовується з тиском 0,4–0,6 МПа. По ходу ступенів інтервал температур рідини, що упарюється, змінюється від 90–100 до 50–60 °С. Нижче 50 °С вакуум-випарювання є економічно не вигідним. Проблемою вакуум-випарювання є налипання органічних речовин на стінки камери, тому ВВУ доводиться регулярно чистити (1 раз на місяць). Для цього використовується промивка гарячим розчином 4–6 % NaOH або 4–6 % розчином HNO₃ протягом близько 12 год, що призводить до посилення корозії поверхонь, додаткових витрат, збільшує обсяг рідких стоків.

Кінцевий етап концентрування кормового продукту – *сушіння*. Головне, що визначає умови сушіння – це збереження кормових якостей продукту, його засвоюваності та біологічної цінності.

Сушіння *вальцюванням* має низьку продуктивність, для нього є характерним налипання продукту на барабани, до 15 % втрат продукту, проте використання його є доцільним при отриманні продукту з твердою фазою (після твердофазної або глибинної гетерофазної ферментації).

Ліофільне сушіння використовується для сушіння термолабільних продуктів та отримання живих клітин (процес тривалий та погано автоматизований).

Розпилювальна сушарка має високу продуктивність, більшу швидкість випаровування. Частинки матеріалу, що висушується, не перегріваються, так як час контакту матеріалу з теплоносієм невеликий, що призводить до менших втрат продукту в порівнянні, наприклад, з вальцевою сушаркою. Використовуються розпилювальні сушарки або з форсункою, або з диском, що швидко обертається. Недолік форсунок – швидке засмічення та ерозія поверхні

(ямки) у місці, куди потрапляє струмінь продукту через неідеальне розпилення форсункою. Диск також еродується, що призводить до нерівномірного розпилення.

Інші конструкції сушарок: струминного типу, з інертним псевдозрідженим носієм не набули широкого поширення у виробництві кормових продуктів.

Після сушіння продукт повинен містити трохи більше 8–10 % вологи. У цьому випадку він може довго зберігатися без істотного погіршення якості.

Товарна форма кормового продукту у вигляді *порошку* (після розпилювальної сушарки) не завжди зручна (порошок пилить, тварини погано його поїдають), тому продукт може додатково *гранулюватися*.

Для *отримання гранул* порошок зволожується, паста надходить у гранулятор, проходить через фільтри, розрізається і потім заново підсушується. Гра-нуляція може також відбуватися при сушінні в киплячому шарі.

Якщо всі клітини мікроорганізмів необхідно *інактивувати*, часто використовуються *плазмоліз* і *пастеризація* (перед сушінням). При плазмолізі клітини відмирають і лізують. Температура плазмолізу 60–80 °С, тривалість обробки – десятки хвилин. Якщо в технологічній схемі передбачена вакуум-випарка, то плазмоліз зазвичай не потрібен, так як клітини відмирають безпосередньо у ВВУ.

Пастеризацією інактивують вегетативні клітини мікроорганізмів за 70–90 °С. Для інактивування спор середу спочатку обробляють при температурі 85–90 °С. Після чого її витримують при температурі росту мікроорганізмів до проростання неінактивованих спор і знову нагрівають.

Фасування та упаковка. Під час фасування необхідно забезпечити мінімальний контакт обслуговуючого персоналу з продуктом. У випадку продукту, що пилить, використовують витяжку з циклонними сепараторами, за допомогою яких пил продукту збирається в бункери і повертається на упаковку. Сухий продукт фасують у кількості до 25–30 кг у 2- або 3-шарові мішки з паперу, поліетилену, в банки, просто навалом. Рідкий продукт розливають у цистерни, бідони та інші ємності.

Продукт з вологістю 70–80 % та живими мікроорганізмами випускається у вигляді пасти, пресованих брикетів у меншій розфасовці, які зберігаються за низьких температур.

Іноді в кормовий продукт перед випаровуванням, сушінням або упаковкою вносять додаткові компоненти: поживні добавки, стабілізатори, анти-окислювачі, компоненти, що запобігають злежуваності препарату, різні

тверді наповнювачі і носії і т. д. Це необхідно для стандартизації продукту, забезпечення оптимальної кормової цінності та інших споживчих характеристик, необхідних технологічних властивостей при його згодовуванні.

Можна навести такі приклади схем виділення продукції:

1. глибинне культивування на рідких середовищах:

а) вміст біомаси наприкінці ферментації невисокий (0,5–1 %):

флотація → сепарація → вакуум-випарювання → сушка

б) вміст біомаси наприкінці ферментації високий (1,5–2,5 %):

сепарація I → сепарація II → вакуум-випарка → сушіння

2. глибинне гетерофазне культивування:

фільтрація → пастеризація → сушіння

або

вакуум-випарювання → сушіння

Флотацією, фільтрацією і сепарацією видаляється більша частина води з концентрованої суспензії мікроорганізмів при істотно менших енерго-і тепловитратах, ніж під час вакуум-випарки і сушінні. Іноді можливе повернення частини фільтрату або фугату, що утворюються, на стадію підготовки живильного середовища або ферментації. У цьому випадку зменшуються обсяги споживаної води та рідких стоків.

На невеликих установках для економії капітальних витрат після сепарації продукт можуть відразу подавати на розпилювальне сушіння, або замість сепарації використовується схема вакуум-випарка – розпилювальне сушіння.

Такі методи виділення, як іонний обмін, екстракція, електродіаліз, осадження, ультрафільтрація, хроматографія, що використовуються при виділенні та очищенні біологічно активних речовин при отриманні кормового білка, застосовуються рідко. Вони є високовитратними та доцільні лише при отриманні продуктів харчового призначення: білків, амінокислот, вітамінів.

2.1.3. Техніко-хімічний контроль та забезпечення якості продукції

Техніко-хімічний контроль – це робота, пов'язана з виконанням фізичних, фізико-хімічних, хімічних, мікробіологічних методів аналізу за місцем по всій технологічній лінії в цехових і заводських умовах.

Зміст техніко-хімічного контролю на виробництві визначається нормативно-технічною документацією та регламентом заводу. Нормативно-технічна документація визначає показники та склад будь-якої речовини сировини, напівпродуктів, продуктів. Розрізняють таку нормативно-технічну

документацію:

- міждержавні стандарти, керівні документи, рекомендації;
- національні стандарти України;
- керівні документи Держспоживстандарту України (КНД і Р);
- державні класифікатори;
- галузеві стандарти (ОСТ) і технічні умови (ТУ), затверджені до 1 січня 1992 р., термін дії яких продовжений, якщо вимоги цих НД не суперечать чинному законодавству України;
- стандарти організацій і галузеві стандарти України (СОУ, ГСТУ), зареєстровані Державним підприємством «Український науководослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації і якості» (ДП «УкрНДНЦ»);
- технічні умови, зареєстровані територіальними органами Держспоживстандарту України – центрами стандартизації, метрології й сертифікації;
- нормативні документи центральних органів виконавчої влади України.

Позначення НД мають такі індекси:

ДСТУ – національні стандарти, затверджені Держспоживстандартом України;

ДСТУ *ISO* – національні стандарти, через які уведені стандарти Міжнародної організації по стандартизації (*ISO*). Номер стандарту відповідає номеру міжнародного стандарту, а рік – року твердження національного стандарту;

ДСТУ *EN* – національні стандарти, через які уведені європейські стандарти (*EN*);

ДК – державні класифікатори.

Регламент заводу затверджується уповноваженим відомством та має обов'язковий характер у ході технологічного процесу. На рис. 2.7 наведена схема техніко-хімічного контролю типового біотехнологічного виробництва при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів.

Необхідно проконтролювати:

На стадіях приготування живильного середовища та підготовки повітря.

1) Склад, концентрація субстрату. На підприємствах це показник, який завжди контролюється.

2) Хімічний склад солей, наявність шкідливих домішок (якщо передбачається їх наявність).

3) Домішки у воді (наприклад, жорсткість води).

4) Якість повітря – якість очищення від пилу і мікроорганізмів, відсутність забруднень після компресора.

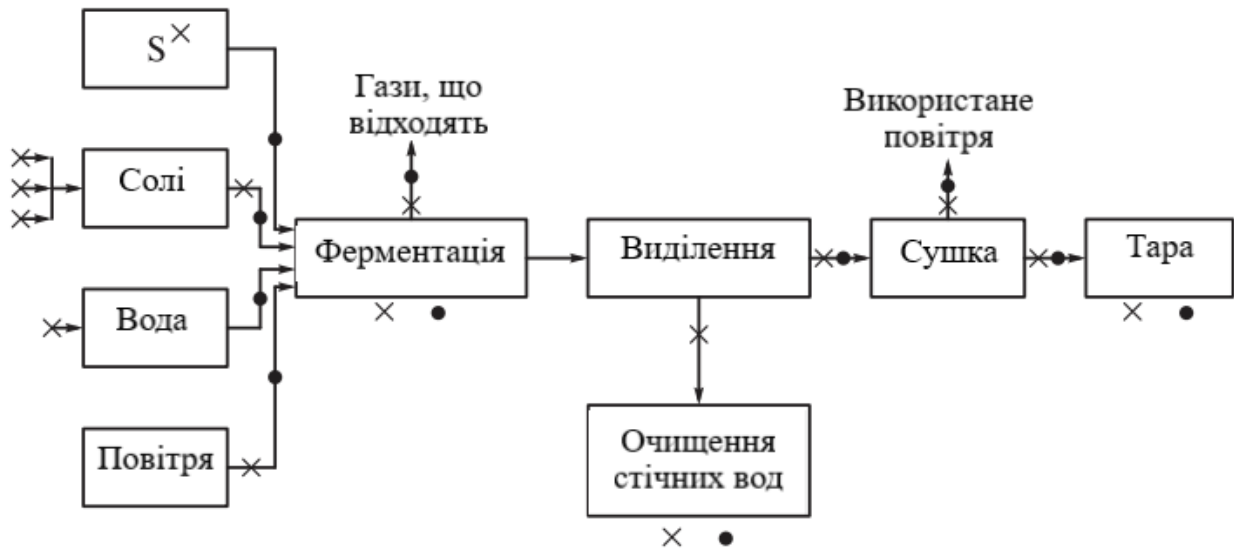


Рис. 2.7. Техніко-хімічний контроль при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів: x – хімічний контроль; • – мікробіологічний контроль

У ферментері.

Хімічні показники

5) Концентрація субстрату – чи достатньо його у ферментаційному середовищі, чи слід припиняти процес.

6) Концентрація фосфору, азоту, живильних солей.

7) Концентрація продуктів метаболізму.

Мікробіологічні показники

8) Концентрація мікроорганізмів.

9) Стан культури – кількість живих і мертвих клітин, кількість брунькуючих, споруючих клітин.

10) Концентрація супутньої мікрофлори та її склад.

Контроль цих показників є важливим для спостереження за стерильністю процесу та отримання якісного продукту.

Фізико-хімічні параметри

11) Температура, рН, тиск, витрата живильного середовища та повітря, рO₂ та інші параметри ферментаційного середовища.

12) Потік газів, що відходять, з ферментера, їх склад. Важливими є співвідношення між O₂ та CO₂, концентрація летких продуктів метаболізму,

концентрація мікроорганізмів (продуцентів та супутніх).

На стадії виділення

13) Склад та концентрація культуральної рідини, концентрація мікроорганізмів.

14) Коефіцієнт згущення – відношення концентрації біомаси або іншого цільового продукту до їх концентрації у вихідній постферментаційній рідині.

На стадії сушіння

15) Вологість цільового продукту після сушарки.

16) Вміст мікроорганізмів та білка у газоповітряних викидах.

Контроль готового продукту

17) Усі показники, зазначені у нормативно-технічній документації:

- вміст основної речовини та домішок (особливо важких металів, металомагнітних домішок, зольність продукту та ін);
- вміст продуцента та забруднюючої мікрофлори, спор, токсинів;
- відсутність живих клітин мікроорганізмів, або навпаки - титр живих клітин.

Контроль складу стічних вод

- біологічне споживання кисню,
- хімічне споживання кисню,
- вміст амонійного та нітратного азоту, фосфору,
- наявність санітарно-показової мікрофлори.

Для якості кормового продукту важливими є наступні характеристики:

- мінімальний вміст сторонньої мікрофлори;
- максимальний вміст протеїну та оптимальний склад незамінних амінокислот;
- мінімальний вміст шкідливих домішок.

З технологічних заходів для зменшення вмісту сторонньої мікрофлори ефективні наступні:

- підтримка асептичних умов;
- використання якомога більш простих середовищ; наявність вітамінів, амінокислот, інших органічних домішок збільшує вміст супутньої мікрофлори; у субстраті не має бути багато мертвих клітин мікроорганізмів, які можуть бути джерелами чинників зростання;
- використання високих швидкостей розведення (для проточної ферментації: швидкість розведення, D розраховується за рівнянням $D = F / V$, де F – швидкість надходження живильного середовища, л / год⁻¹; V – обсяг

ферментера) культуральні штами вирощують при $D = 0,20\text{--}0,25 \text{ год}^{-1}$; питома швидкість зростання дикої мікрофлори зазвичай нижча ($0,1\text{--}0,15 \text{ год}^{-1}$), вона утримується у ферментері при $D > 0,2 \text{ год}^{-1}$;

– забезпечення киснем процесу, тобто використання ферментерів з високими масообмінними характеристиками; якщо концентрація O_2 в середовищі падає, то для досягнення необхідного ступеня конверсії субстрату в біомасу необхідно зменшувати швидкість розведення, але це призводить до збільшення чисельності сторонньої мікрофлори;

– при культивуванні дріжджів є доцільним ведення процесу у закисленому середовищі ($pH\ 4,2\text{--}4,6$); дріжджі при цьому pH ростуть добре, а зростання більшості бактерій пригнічується.

Вміст протеїну в біомасі дріжджів зазвичай становить від 30 до 60 %; у біомасі бактерій – до 80 %.

До падіння вмісту протеїну призводять:

– збільшення температури ферментації, особливо в літній час, коли через підвищення температури охолоджуючої води тепловідведення з ферментера утруднене (використання термофільних штамів не усуває проблему, оскільки вони містять менше білка);

– недостатнє забезпечення процесу біосинтезу киснем;

– перехід на азотдефіцитне середовище; важливим є співвідношення $C : N$ і $N : P$ (оптимальне співвідношення $N : P_2O_5 = 2\text{--}1,5 : 1$).

Зменшення вмісту шкідливих домішок у продукті досягається:

– ретельнішою передобробкою поживних субстратів;

– використанням мінеральних солей з низьким вмістом домішок (але їх вартість вища);

– промиванням біомаси на стадії виділення;

– зниженням рециклу відпрацьованої (безклітинної) культуральної рідини, що, однак, збільшує кількість стічних вод.

2.1.4. Принципи організації маловідходного виробництва

Джерела відходів та забруднень виробництва:

1. охолоджувальна вода та конденсат пари з теплообмінників;

2. промивні води та розчини;

3. побічні продукти культуральних рідин;

4. газоповітряні викиди (переважно з ферментерів, сушарок);

5. стоки з іонообмінних колон, пермеати або концентрати мембранного

поділу, маткові розчини після кристалізації тощо;

6. хімікати та розчинники зі стадій виділення;

7. стічні води;

8. активний мул очисних споруд;

9. шлами з солепідготовчих відділень та відходи зі стадії підготовки субстрату (лігнін у виробництві на гідролізатах деревини).

Варіанти утилізації та зменшення відходів та стоків:

1. *Створення замкнутого циклу водоспоживання шляхом:*

а) охолодження оборотної води з теплообмінників у градирнях (або в холодильних агрегатах) та її рециркуляції у виробництво;

б) використання промивних вод для приготування розчинів поживних солей. Цей варіант не завжди можливий через необхідність балансування сольового складу середовища, накопичення токсичних елементів, метаболітів, інфікуючих мікроорганізмів;

в) повернення безклітинної культуральної рідини на стадію ферментації. У ряді випадків вдається повертати до 80 % культуральної рідини після фільтрації чи сепарації;

г) повернення очищеної води з очисних споруд на підприємство. При поверненні оборотної води та води з очисних споруд на підприємство мінералізація води зростає. Після кількох циклів обороту зростання мінералізації уповільнюється і в міру збільшення циклів склад оборотної води стабілізується, часто, однак, перевищуючи ГДК за домішками, що містяться. Тому частину оборотної води необхідно демінералізувати (на нафтопереробних заводах на демінералізацію направляється близько 0,5 % оборотної води, на металургійних – близько 10 %). Демінералізація незначно підвищує середню сумарну вартість води. У системах оборотного водопостачання поряд з демінералізацією та охолодженням оборотної води зазвичай передбачається її хімічне чищення – для видалення органічних та біогенних речовин, що накопичуються в оборотній воді.

2. *Очищення та використання газоповітряних викидів:*

а) очищення викидів у мокрих скруберах, циклонах та на фільтрах. Вода зі скрубера прямує на очисні споруди;

б) повернення викидів із сушарок у топку сушарки. Однак при цьому в топку надходить відпрацьоване повітря з підвищеною вологістю, що призводить до збільшення витрат палива на сушіння;

в) використання CO₂, що виділяється, для приготування сухого льоду (при спиртовому бродінні).

3. *Вилучення та переробка відходів та побічних продуктів*, у тому числі – культивування мікроорганізмів на відходах та стоках. Наприклад, стічні води виробництва антибіотиків можуть бути субстратом для дріжджів. Якщо продукти метаболізму одного мікроорганізму-продуценту не є інгібіторами для іншого, можна реалізувати «метаболічно замкнений» технологічний процес. Відповідна термічна обробка одержуваних стоків забезпечує підтримку асептичних умов проведення процесу.

4. *Регенерація хімікатів* – екстрагентів, елюентів тощо.

5. *Повторне використання маткових розчинів* зі стадії кристалізації.

6. *Переробка та утилізація активного мулу* очисних споруд. Однак широке використання активного мулу обмежується великими витратами на концентрування мулу, підвищеним вмістом у ньому важких металів та патогенної мікрофлори.

7. *Рекуперація тепла*. Різні заходи щодо вдосконалення технології конверсії рослинної сировини та органічних відходів у кормові продукти можна одночасно розглядати і як заходи щодо еко-логізації виробництва.

Незважаючи на те, що відходи відносять до дешевої сировини (вторинним матеріальним ресурсам), отримання з них кормових продуктів пов'язане з істотними матеріальними та енерговитратами. Тому важливим є напрямок вдосконалення біотехнології кормових продуктів – зменшення витрат сировини та енергії на одиницю продукції. Цього можна досягти більш глибокої передобробкою субстратів, зокрема, з використанням ферментів, вирощуванням змішаних культур, що утилізують різні компоненти попередньо обробленої сировини.

Інший напрямок вдосконалення – *підвищення кормової цінності* (перетравності, поживності) продуктів, наприклад, шляхом збагачення їх незамінними амінокислотами, вітамінами та іншими корисними добавками за допомогою змішаних культур мікроорганізмів, стабілізації швидкопсувних відходів молочнокислим бродінням з подальшим вирощуванням на них кормових дріжджів, використовуючи додаткову обробку ферментами.

Обробка ферментами використовується і як самостійний метод підвищення кормової цінності рослинної сировини. Для цієї мети найбільш перспективними є *мультиензимні композиції* (МЕК), які створюються на базі кількох ферментних препаратів, що отримуються з різних продуцентів. Вони дозволяють у складі комбікормів, особливо незбалансованих по поживним компонентам, досягти більш раціонального співвідношення ферментів, що забезпечують необхідне розщеплення природних полімерів. В даний час

мультиензимні препарати введені в рецептуру преміксів для різних видів тварин та птиці.

Підвищення рентабельності виробництва може бути досягнуто *комплексною переробкою* сировини і біотехнологічних напівпродуктів з отриманням кількох цільових продуктів. Наприклад, на основі кормових дріжджів або бактерій можна отримувати автолізати або ферментолізати, амінокислотні суміші, різні препарати нуклеотидної та білкової природи, виділяти з біомаси ліпіди, нуклеїнові кислоти, мононуклеотиди та нуклеозиди, інші продукти, що застосовуються в медицині, ветеринарії та сільському господарстві.

2.1.5. Особливості мікробіологічної переробки в кормові продукти деяких відходів

Переробка молочної сироватки

Переробка сироватки на продукти кормового призначення має ряд переваг у порівнянні з альтернативними варіантами. При використанні її на харчові цілі технологічні, санітарно-гігієнічні вимоги є суворішими, що підвищує витрати на переробку. Зброджування сироватки в етанол або молочну кислоту є доцільним тільки на установках з продуктивністю більше 100 т/доб по сироватці, що переробляється. Сама нативна сироватка як кормовий продукт є неефективною. Склад цього корму не збалансований через високий вміст лактози (3–5 %) і невисокого – білка (менше 1 %), тому прирости ваги худоби, що харчується сироваткою, невеликі. Організм тварини засвоює не більше 20 % поживних речовин сироватки. Та кількість, яку необхідно згодувати тварині для забезпечення її 100 г протеїну, не може бути спожита нею за рахунок сироватки (10,0–16,6 кг/добу). Надлишок сироватки в раціоні може вести до розладів шлунково-кишкового тракту тварин, що пов'язано з нездатністю сичужного ферменту шлунка коагулювати велику кількість сироваткових білків. При надмірному вирощуванні сироваткою в організмі відбувається поступове накопичення лактози, що повільно засвоюється, що веде до так званого «лактозного отруєння». В організмі птахів лактоза не засвоюється, що пов'язано з відсутністю у них ферменту лактази. Таким чином, використання сироватки в кормових цілях без її попереднього збагачення білком нераціонально. Один із шляхів вирішення цієї проблеми полягає в мікробіологічній переробці сироватки з засвоєнням лактози мікроорганізмами та отриманням збагаченого мікробним білком продукту.

Молочна сироватка є гарним середовищем для культивування мікроорганізмів з метою отримання кормового білка та біодобавок, що містить природний набір життєво важливих мінеральних сполук, вітамінів та інших факторів росту.

Насправді реалізувати економічний процес переробки молочної сироватки в кормовий продукт досить складно. Це пов'язано з тим, що безпосередньо поблизу молокопереробного підприємства заборонена експлуатація установок з мікроорганізмами, які не використовуються під час виробництва молочних продуктів. Особливо суворі ці обмеження для дріжджів. Перевезення ж на віддалені відстані сироватки і кормових продуктів її переробки без видалення надмірної вологи призводить до великих транспортних витрат при допустимих термінах реалізації охолоджених продуктів не більше 1 доби. Тому установки з переробки сироватки в кормовий продукт мають бути невеликої потужності, при якій питомі витрати на отримання цільового продукту великі.

Як продуценти при мікробіологічній переробці сироватки в кормові продукти можуть використовуватися різноманітні аеробні мікроорганізми: дріжджі (рр. *Torulopsis*, *Kluyveromyces*, *Saccharomyces*, *Candida*, *Trichosporon*, *Mycotorula*), бактерії, мікроскопічні гриби (рр. *Penicillium*, вищі базидіоміцети (*Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor*, *Panus tigrinus*, *Tyromyces albellus*, *Inonotus obliquis* та інші, здатні рости в глибинній культурі), змішані культури різних мікроорганізмів, що мають здатність ефективно використовувати для своєї життєдіяльності лактозу. Застосування змішаної культури (у тому числі і мікроорганізмів, що не впереробляють лактозу) дозволяє утилізувати різні компоненти сироватки. Можливі послідовні анаеробно-аеробні процеси переробки з вирощуванням на першій стадії, наприклад, молочнокислих бактерій і на другій, аеробної, – дріжджів. Обробка сироватки тільки в анаеробних умовах для підвищення її поживної цінності можлива, проте в цьому випадку лактоза конвертується головним чином в молочну кислоту, а не в мікробний білок, що більш ефективно засвоюється тваринами.

Найбільша кількість досліджень з біосинтезу білка на молочної сироватці проведено з використанням дріжджів та дріжджоподібних організмів. Для них характерні великі швидкості росту, здатність до зростання в умовах глибинного культивування, невибагливість до умов культивування. У середньому абсолютно сухі дріжджі містять 45–55 % білка, 25–35 % вуглеводів, 2–5 % жиру, 6–8 % золи і являють собою фізіологічно повноцінний високобілковий продукт. Відповідно і промислові технології в різних країнах створені та

здійснені на базі дріжджів як продуцентів білка. За амінокислотним складом вони близькі до складу суміші кісткового і м'ясного борошна.

Промислові продуценти повинні мати ряд властивостей, що відповідають певним технологічним та виробничим вимогам:

- швидке зростання на лактозі та інших органічних субстратах молочної сироватки в аеробних умовах з високим виходом біомаси та протеїну;

- активне зростання на всіх видах молочної сироватки: згущеної та незгущеної, освітленої та неосвітленої, сирної, підсирної, казеїнової, копреципітатної, а також на безбілковому ультрафільтраті молочної сироватки без будь-яких істотних змін у технологічному процесі;

- стійкість до наявності сторонньої мікрофлори у неасептичних умовах культивування та домінування штаму-продуцента у популяції мікроорганізмів, присутніх у робочому середовищі ферментера;

- бажано, щоб продуцент не надавав несприятливого впливу на заводські культури мікроорганізмів, що використовуються на підприємствах молокопереробної промисловості для виробництва сиру та інших продуктів;

- з точки зору санітарно-гігієнічних, токсикологічних, екологічних вимог до продукту, алергічних та інших побічних впливів на обслуговуючий персонал бажано, щоб нативна молочна сироватка була природним середовищем для використовуваних мікроорганізмів або їх змішаної культури;

- здатність до оптимального зростання при температурі не нижче 30–34 °С, так як в цьому випадку істотно знижуються витрати на охолодження ферментеру в ході культивування і зменшується небезпека зниження зростання продукту через перегрівання ферментеру, зокрема, в літню пору року;

- стійкість необхідного фізіологічного стану дріжджів до відхилень технологічних параметрів (підвищення температури, зміни рН, погіршення масообмінних умов, зниження якості субстрату та ін).

Найбільш продуктивні за накопиченням біомаси та вмістом внутрішньо-клітинного білка дріжджі, зокрема *Candida kefir*, які засвоюють лактозу тільки в аеробних умовах. Проте серед дріжджів р. *Candida* зустрічаються види, що належать до групи умовно-патогенних мікроорганізмів, тому як продуценти біомаси використовуються дріжджі рр. *Kluveromyces*, *Torulopsis*, *Saccharomyces*, що відносяться до групи непатогенних дріжджів.

Для отримання повноцінної біомаси необхідно, щоб усі необхідні для синтезу клітинного матеріалу сполуки знаходилися в живильному середовищі в достатній кількості. Сироватка містить різні макро- і мікроелементи, проте не всі вони знаходяться в доступній для дріжджової клітини формі або необхідної

кількості. Дріжджі практично не засвоюють сироваткові білки, тому азот білків їм недоступний. Незначні кількості низькомолекулярних органічних і неорганічних азотовмісних сполук хоч і засвоюються, але не можуть задовольнити потребу дріжджових клітин в азоті. Найбільш дешевими і доступними для дріжджів джерелами азоту є сульфат амонію, фосфат амонію, хлорид амонію, сечовина. Їх вносять у молочну сироватку, виходячи з передбачуваного виходу біомаси та вмісту в ній протеїну, але не нижче від мінімальних кількостей, при яких забезпечуються необхідні швидкості росту та врожай за білком. Необхідно також внесення невеликої кількості фосфору у вигляді фосфату амонію (при цьому частково покривається потреба в азоті), калію фосфатів і натрію або у формі ортофосфорної кислоти. Інші мінеральні речовини присутні в молочній сироватці в кількостях, що забезпечують нормальне зростання більшості видів дріжджів. З метою регулювання зростання дріжджів та активності споживання ними поживних речовин іноді в сироватку вводять додаткові іони калію та магнію. Як основні джерела вуглецю дріжджі використовують лактозу і органічні кислоти сироватки. З органічних кислот більшість припадає на молочну кислоту, концентрація якої зростає зі збільшенням терміну зберігання сироватки. Існують штами дріжджів, які спочатку споживають лактозу, а потім молочну кислоту, і навпаки.

З 5 % лактози, що міститься у сироватці, після проведення дріжджової ферментації можна отримати ~ 2,50 % дріжджів (за сухими речовинами) або ~ 1,25 % білка; з 1 % органічних кислот, що містяться в сироватці, можна отримати ~ 0,5 % сухих речовин дріжджів або ~ 0,25 % білка. Сироватковий білок, що міститься в кількості до ~ 1 %, дріжджами не споживається і залишається в тій кількості після ферментації. Таким чином, якщо ферментаційний процес проводити на неконцентрованій та нерозбавленій нативній сироватці, то у найкращому випадку можна отримати продукт із вмістом ~ 2,5 % білка (замість вихідного ~ 1 %).

Найбільш простий у реалізації та найменш енергоємний спосіб переробки сироватки *без попереднього згущення*. За цим варіантом проводиться ферментування (дріжджування) сироватки (сирної, підсирної та ін), що надходить, селекціонованими штамами мікроорганізмів. Ферментована сироватка після теплової обробки згодовується худобі.

Для підвищення вмісту білка в ферментованій сироватці можна її переробляти в *згущеному вигляді* (при вмісті лактози до 10 %) або додавати до неї мелясу, спирт, молочну кислоту та інші субстрати, що підвищують концентрацію біомаси в культуральній рідині. Згущення сироватки призводить

до інактивації спор та загибелі мікроорганізмів (при 18–19 % СР у сироватці переважна частина мікроорганізмів гине). Промислові продуценти на основі дріжджів здатні зростати при концентрації лактози до 20–24 %. Однак використання концентрованої сироватки, що одержується упарюванням, суттєво підвищує вартість продукту. Крім того, вихід дріжджів та вміст білка з підвищенням концентрації субстрату падають. При таких концентраціях лактози важко забезпечити необхідний масообмін за киснем, і якщо процес перетікає при лімітуванні зростання киснем, це також знижує вихід біомаси і білка.

При переробці молочної сироватки ферментаційний процес проводять за варіантом періодичного режиму культивування в асептичних або не строго асептичних умовах, тому сироватку перед ферментацією пастеризують. З урахуванням вимог до стерильності безперервні, проточні режими ферментації не використовуються.

Конструкція ферментера, система контролю та регулювання повинні забезпечувати можливість автоматичної підтримки необхідних параметрів культивування протягом усього терміну ферментації. Для цього ферментер оснащується системою автоматичного контролю температури та регулювання подачі холодної та гарячої води в сорочку або змішувик, системою контролю та підтримки рН, системою піногашення, контролю рівня розчиненого кисню для визначення характеру перебігу ферментаційного процесу та моменту закінчення ферментації (див. рис. 2.4). У разі наявності у ферментері системи регулювання швидкості обертання мішалки або подачі повітря, можливе проведення процесу за оптимального рівня постачання ферментаційного середовища киснем.

Для зменшення інфікованості процесу (сироватка є субстратом, схильним до інфікування), рН необхідно підтримувати на низькому рівні. Молочна кислота, що утворюється при закисанні сироватки, грає роль буфера і не дає знизитися рН нижче 4, тому сироватка має велику буферну ємність і при періодичному процесі культивування підтитрування лугом може не знадобитися. Насправді культивування ведуть при рН в інтервалі 5,0–5,5. У цьому діапазоні органічні кислоти знаходяться переважно в дисоційованій формі, що краще засвоюється дріжджами, і в той же час кислотність середовища достатня для пригнічення росту бактеріальної мікрофлори, що інфікує.

При зростанні на нативній молочній сироватці, що містить 3–5 % лактози, у фазі максимальної швидкості накопичення біомаси потрібно близько 3–5 г

O_2 /(л·год). Системи з підведенням енергії на перемішування тільки за рахунок барботажу не забезпечують ферментаційний процес необхідною кількістю кисню.

Більш ефективні апарати з мішалкою та барботажем, проте і при їхньому використанні складно забезпечити не лімітоване киснем зростання дріжджової популяції протягом усього циклу культивування.

Для проведення ферментації необхідний інокулят (засівні дріжджі), для приготування якого потрібне додаткове обладнання та заходи щодо мікробіологічного, аналітичного та технологічного контролю. Посівний матеріал може вироблятися централізовано спеціалізованими організаціями з дотриманням вимог мікробіологічного та санітарно-гігієнічного контролю і потім доставлятися у вигляді нативної суспензії, пресованої біомаси або ліофільно висушеним. Для установки продуктивністю 10 т/доб за переробленій сироватки потрібно близько 10 кг пресованої біомаси дріжджів щодобово. Отримання посівного матеріалу безпосередньо за місцем переробки сироватки вимагає як додаткового устаткування, так і вищої кваліфікації обслуговуючого персоналу, наявності мікробіологічної лабораторії, вищої культури виробництва, забезпечення асептичних умов ферментації, наявності технологічної лінії подачі пари для стерилізації устаткування.

У технологічній схемі мають бути передбачені допоміжні ємності для зберігання вихідної сироватки та ферментованої сироватки.

Об'єм та кількість допоміжних ємностей вибираються за умови зберігання сироватки не більше 24 годин за температури 8–10 °С або не більше 6 годин при температурі 20 °С.

Пастеризація ферментованої сироватки проводиться на пастеризаційних установках, що використовуються в молокопереробній промисловості або аналогічних, при рекомендованих режимах обробки. Пастеризовану суспензію не охолоджують, якщо продукт згущують і сушать. Згущення та сушіння проводять на вакуум-випарних установках та розпилювальних сушарках, що використовуються при отриманні сухих продуктів молокопереробки.

Переробка барди спиртового виробництва

Первинна барда є основним відходом спиртового виробництва. На спиртових заводах, що переробляють зерно, на кожні 1000 дал (декалітрів) спирту в середньому утворюється 130 м³ зернової післяспиртової барди (тобто на одну об'ємну частину спирту припадає 13 частин відходів спиртової барди). Щорічно на вітчизняних спиртових заводах утворюється близько 10 млн. м³

барди.

Барда містить речовини, що залишаються після відгону спирту з бражки:

- невикористану при бродінні частину органічної речовини зерна,
- мінеральні речовини зерна,
- біомасу дріжджів, що утворилася, і продуктів їх життєдіяльності (органічні кислоти та ін),
- частину дробленого солоду.

Вихід барди залежить від вмісту спирту у компанії. Склад первинної барди змінюється в залежності від виду сировини, що переробляється на спирт.

За видами сировини барду поділяють на:

- мелясну,
- зернову,
- картопляну,
- змішану – зерно-картопляну.

Свіжа барда має кислу реакцію (рН 4,2–4,4). За вмістом сухої речовини та її складу зернова і картопляна барда різняться (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Склад зернової та картопляної барди

Показник	Зернова барда	Картопляна барда
Сухі речовини, %	6,7–8,4	3,0–4,0
в тому числі:		
сирий протеїн	1,8–2,2	0,6–0,8
клітковина	0,9–1,7	0,3–0,4
попел	0,6–0,7	0,4–0,5
безазотисті екстрактивні речовини	3,4–3,8	1,7–2,3

В Україні традиційно вважалось найбільш доцільним використання барди (спільно з дріжджовою біомасою) для годівлі сільськогосподарських тварин. Основна цінність барди полягає в присутності протеїна, вміст якого в сухій речовині зернової барди становить в середньому 26–28 %, картопляної – 18–19 %. Одна тонна картопляної барди містить 10–15 кг протеїну. Тому в попередні роки використовували майже всю нативну барду у натуральному вигляді для годування тварин. Однак через високий вміст води барду як корм транспортувати дорого. Термін зберігання цього вторинного сировинного ресурсу обмежений, тому для її згодовування на більшості спиртових заводів були побудовані великі відгодівельні комплекси. В останні роки у зв'язку з реорганізацією сільськогосподарського виробництва великі тваринницькі комплекси було ліквідовано та застосування барди ними припинено. На багатьох збережених комплексах барда затребувана лише в осінньо-зимовий

період як добавка в кормовий раціон великої рогатої худоби. Корм часто буває незбалансованим і неякісним за своїм складом через відсутність фінансових можливостей у підприємств закуповувати всі необхідні кормові складові. Тому нині весь обсяг барди як кормопродукту не вдається повністю реалізувати у натуральному вигляді. Спиртові заводи змушені скидати барду на поля фільтрації чи земляні бардонакопичувачі, що спричиняє забруднення ґрунтових вод та атмосфери. Також підприємства мусять сплачувати штрафи та податки за забруднення прилеглих територій. Це призводить до додаткових витрат, зниження продуктивності і навіть до зупинки виробництва. Відповідно до вимог, які мали розпочати діяти з 2008 р., заводи, які не утилізують весь обсяг барди, не можуть продовжувати роботу.

Барду можна упарювати й отримувати на цій основі збагачені, концентровані або сухі кормопродукти, що дає можливість утилізувати її у будь-яку пору року. У США понад 95 % зернової барди переробляється на сухий кормопродукт, ціна якого перевищує вартість зерна на 30–50 %.

На деяких вітчизняних спиртових заводах також налагоджено лінії по сушінню барди. В даний час попит на висушену барду зростає, чому сприяють розроблені рекомендації та накопичений досвід щодо застосування цього корму в раціонах сільськогосподарських тварин і птиці. За оцінками, експлуатація цеху сушіння барди підвищує рентабельність всього спиртового заводу на 10–15 %.

Барду як кормопродукт також можна використовувати спільно з рослинними відходами: ячмінною дертю, пшеничними висівками, подрібненою соломною, з відходами біомаси, утвореними при виробництві амілолітичних ферментів на спиртовому виробництві.

Мікробіологічна переробка барди дозволяє отримувати кормові продукти з більш високим вмістом білка, збалансованим амінокислотним і мінеральним складом. Прирости ваги при використанні зернокартопляної барди різного ступеня переробки становлять:

- для великої рогатої худоби при згодовуванні натуральної барди – 5–6%;
- для великої рогатої худоби при згодовуванні сухої барди – до 20%;
- приріст свиней при використанні дріжджів, вирощених на барді – 7–8%;
- для великої рогатої худоби при згодовуванні ферментованої барди – 42%;
- збільшення надоїв молока при використанні дріжджів у складі корму – 16%;
- збільшення надоїв молока при згодовуванні ферментованої барди – до

20%.

Найбільш ефективною формою згодовування кормових продуктів на основі барди є:

- у птахівництві – сухі дріжджі з цільної барди,
- у свинарстві – як сухі, так і рідкі дріжджі (ферментована барда),
- при м'ясному відгодівлі великої рогатої худоби та виробництві молока – рідкий продукт.

Порівняно з неферментованою бардою ферментована як кормопродукт є набагато ефективнішою.

Найбільше підвищення вмісту протеїну в барді забезпечує аеробна ферментація, зокрема, дріжджів р. *Candida*. Технологічна схема одного з варіантів такої переробки методом глибинного або глибинного гетерофазного культивування представлена на рис. 2.8. В результаті ферментації з 1 м³ нативної барди можна отримати до 14–21 кг сухих кормових дріжджів, що містять 47–56 % сирого протеїну. Додавання меляси, кукурудзяного екстракту та інших джерел харчування підвищує вихід біомаси. Також необхідно вносити додаткову кількість солей азоту та фосфору. Культивування ведуть за рН 4,5–5,5. По ходу ферментації органічні кислоти споживаються і рН зростає, тому необхідно підтитрувати ферментаційне середовище кислотою.

При переробці барди методом глибинного гетерофазного культивування, наприклад, мелясної з добавками бурякового жому, зерно-спиртової з добавками борошна, борошняних відходів або подрібненого зерна для виділення біо-маси дріжджів використовуються фільтрація, плазмоліз і сушка на стрічковій сушарці.

Розроблено способи бактеріальної конверсії післяспиртової барди. Вирощуючи як продуценти лізину бактерії *Brevibacterium sp.*, отримують білкові препарати з високим вмістом лізину і вітамінів групи В (В₁, В₂, В₁₂) і РР.

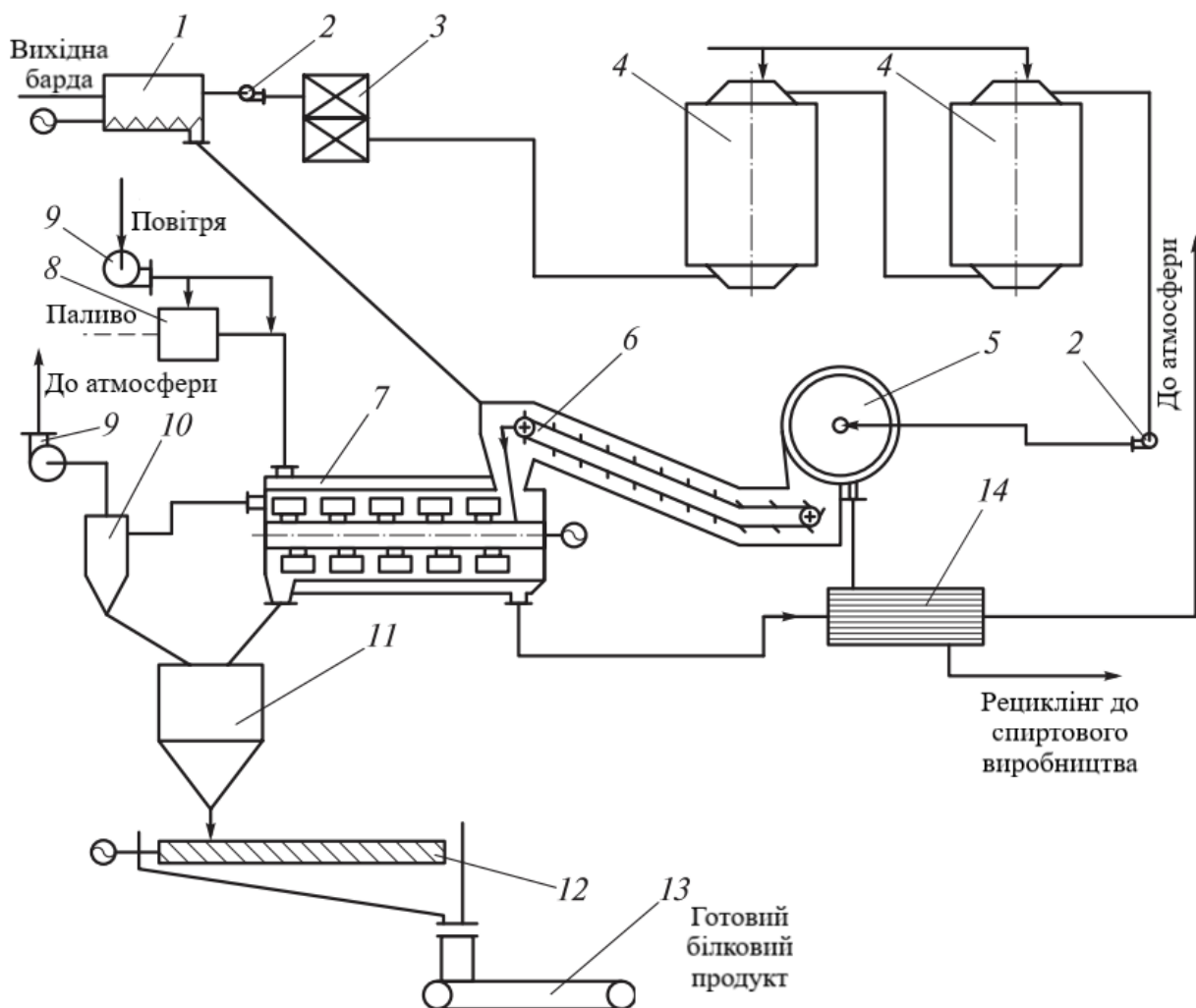


Рис. 2.8. Схема установки для переробки післяспиртової зернокартопельної барди з одержанням білкового кормопродукту: 1 – сепаратор; 2 – насос; 3 – теплообмінник; 4 – реактор; 5 – фільтр рідинний; 6 – транспортер; 7 – сушарка; 8 – теплогенератор; 9 – вентилятор; 10 – циклон; 11 – бункер; 12 – формувач; 13 – упаковка; 14 – стерилізатор

При переробці барди мікробіологічним синтезом та отриманні кормових продуктів виникає проблема утилізації вторинної барди, яка має низьку концентрацію сухих речовин і неприйнятна як корм сільськогосподарським тваринам або для подальшої переробки. Таку барду можна упарити і використовувати для отримання органо-мінеральних добрив.

Варіант комплексної технології вилучення корисних речовин, що містяться в післяспиртовій барді, представлений на рис. 2.9. Отримання сухої барди або аеробна переробка нативної барди в кормовий білок високозатратні через великі витрати енергії на аерацію, концентрування і сушіння кормового продукту, вимагають великих капітальних вкладень, тому в Україні переробка барди залишається однією з актуальних проблем спиртового виробництва.

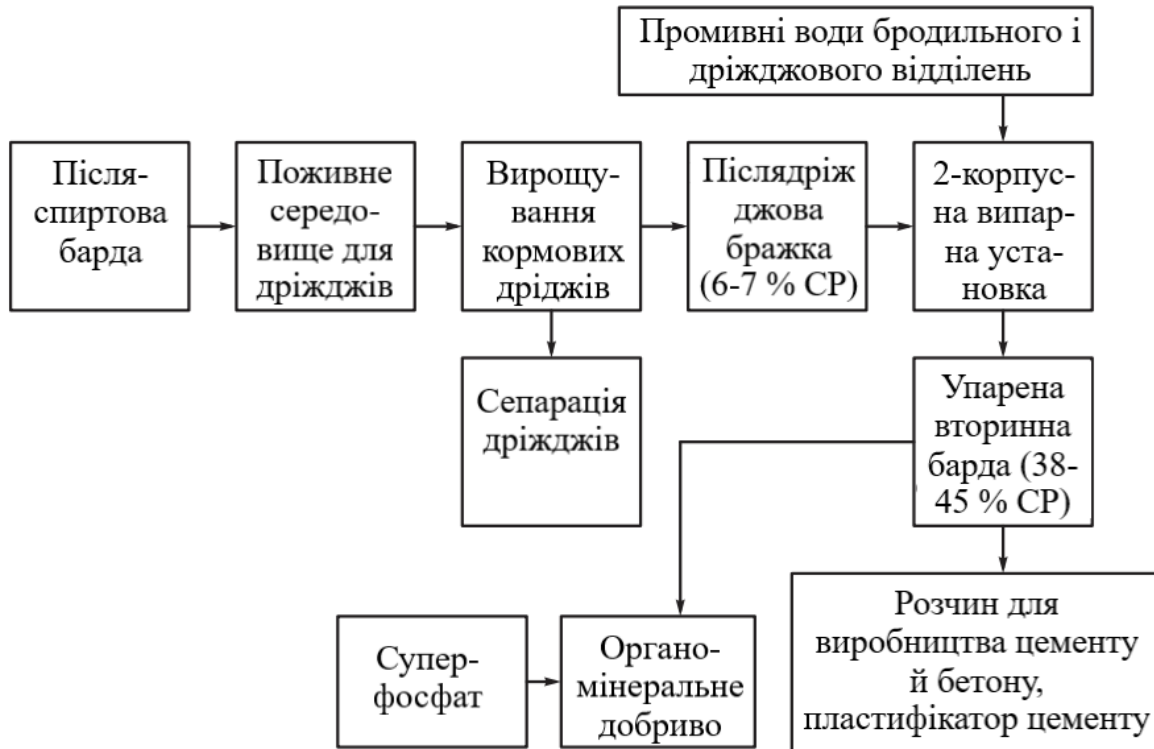


Рис. 2.9. Комплексна технологія отримання корисних речовин, що містяться в післяспиртовій барді

Методи аеробної ферментації, що використовуються при переробці молочної сироватки та спиртової барди, можуть бути успішно застосовані для збагачення кормовим білком відходів тваринництва та птахівництва: стоків тваринницьких ферм, гною, посліду. Зважаючи на те, що співвідношення С : N у них незбалансоване (азот міститься у надлишку), під час проведення ферментації з використанням цих субстратів у середовище необхідно вносити додаткові джерела вуглецю.

Використання активного мулу як кормової добавки

За вмістом білка (30–42 %) незамінних амінокислот, таких як лізин, метіонін, цистин, триптофан, активний мул є близьким до кормових дріжджів. В активному мулі кількість ліпідів (5–10 %) вища, а вуглеводів (3–5 %) нижча, ніж у кормових дріжджах. Відрізняючись підвищеною зольністю (25–30 %), активний мул містить необхідні організму тварин фосфор, кальцій та інші макро- та мікроелементи. У ньому містяться майже всі вітаміни групи В: тіамін (В₁), рибофлавін (В₂), пантотенова кислота (В₅), піридоксин (В₆), біотин (В₇) та ін. Кількість вітаміну В₁₂ у метаногенно зброженому активному мулові міських стічних вод (2,1–11,0 мг/кг) значно перевищує його вміст у м'ясо-кістковому

(0,04 мг/кг) та рибному борошні (0,05 мг/кг). Нині США і Японії є виробництва, які виробляють вітамін В₁₂ з використанням активного мулу.

Висушений активний мул відрізняється високим вмістом вітаміну А та його провітамінів (каротиноїдів) – 50–60 мг/кг сухої речовини, що у десять разів більше, ніж у кормових дріжджах. Вміст вітаміну Е в активному мулі перевищує його вміст в кормових дріжджах вдвічі.

Через підвищену здатність активного мулу адсорбувати та акумулювати у своїй масі токсичні речовини, зокрема важкі метали, поліциклічні ароматичні вуглеводні та інші сполуки, існує небезпека їх потрапляння в корми та організм тварин. Тому в якості білково-вітамінної кормової добавки може бути використаний лише активний мул, що утворюється під час біологічного очищення стічних вод, що мають постійний склад і мінімальний вміст шкідливих домішок (зокрема, харчових і біотехнологічних виробництв). Мікробна біомаса такого мулу може бути стандартизована як кормова добавка до раціону тварин. Однак навіть у цьому випадку через небезпеку підвищеного вмісту токсичних речовин його додають у кількості не більше ніж 1–5 % від маси корму. Варто зазначити, що активний мул міських очисних споруд не може безпосередньо використовуватись як кормова добавка.

Як корм для птахів та тварин використовується активний мул, підсушений до 10 % вологості та простерилізований. Такий сухий і розмелений мул може бути застосований подібно до сухих кормових дріжджів. Обробка мулу з метою очищення його від шкідливих речовин або отримання корисних компонентів без токсичних домішок дозволяє отримувати більш ефективні кормові добавки. Варіант такої додаткової обробки задля видалення важких металів, представлений на рис. 2.10 включає лужну і кислотну екстракцію металів, фільтрування та промивання очищеного мулу.

Кислотна або лужна обробка активного мулу дозволяє екстрагувати з нього білок. Білковий розчин надалі нейтралізують, білок концентрують ультрафільтрацією або осадженням і висушують. Можливе вилучення і вітаміну В₁₂. Для цього ущільнений мул із вологістю 95–96 % підкислюють сірчаною кислотою до *pH* 3 і підігрівають парою до 110 °С. Суспензію активного мулу центрифугують і фугат обробляють лугом до *pH* 5 для коагуляції високомолекулярних компонентів. Осад знову відокремлюють на центрифугу, фільтрат, що містить вітамін В₁₂, випарюють, обробляють лугом, сушать і дроблять. Готовий продукт розфасовують.

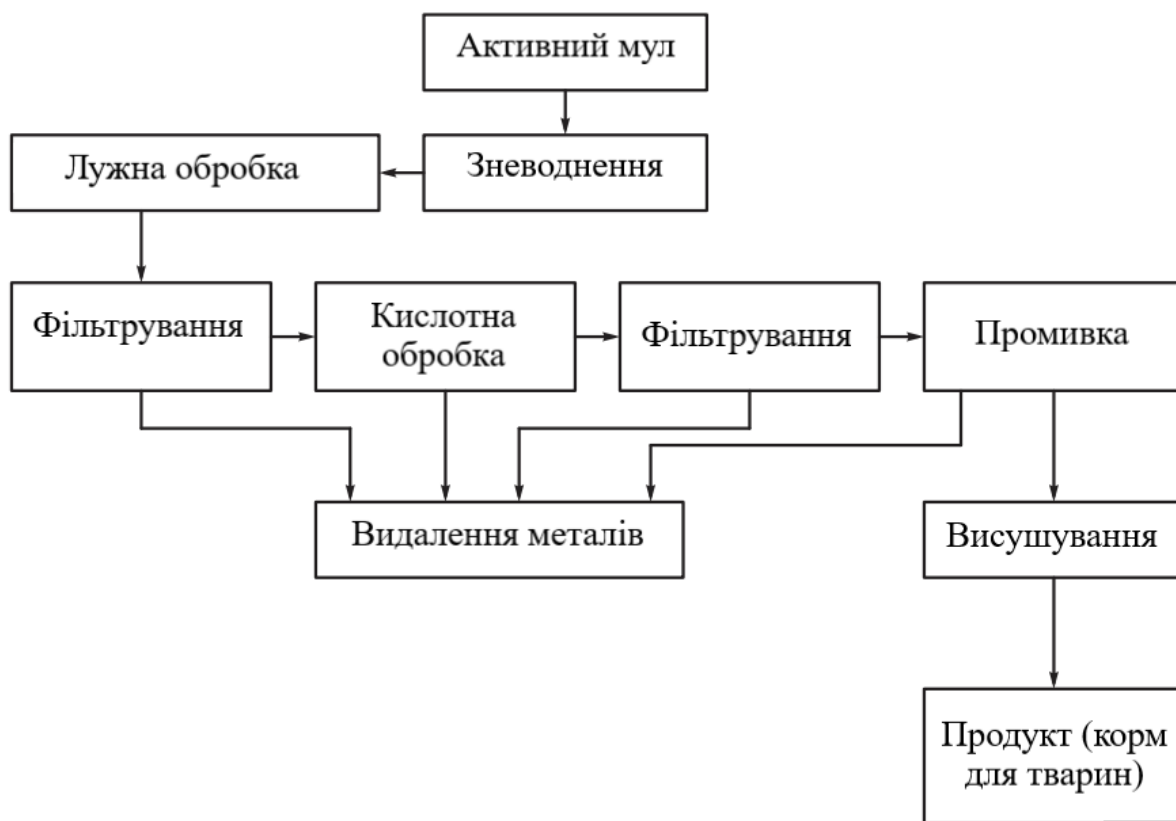


Рис. 2.10. Схема обробки активного мулу при високому вмісті в ньому важких металів

Існуючі варіанти обробки забрудненого активного мулу не дозволяють отримувати з нього відносно безпечні кормові добавки низькозатратними способами. Тому із загальної кількості відходів активного мулу як білково-вітамінний кормовий продукт використовується не більше 0,01 %.

2.2. Силосування

Відходи сільського господарства можна використовувати для отримання кормів силосуванням. *Силосування* – заквашування, анаеробне консервування кормів без доступу повітря; найпоширеніший спосіб заготівлі соковитих кормів. В Україні силосування почали застосовувати наприкінці ХІХ ст. Традиційно силосують рослинний зелений корм: лугову траву, конюшину, люцерну, стебла і листя кукурудзи, соняшника, бадилля цукрових буряків і жому, а також кормові коренеплоди, баштанні і т. п., при цьому підвищується їх поживна цінність, і отримана силосована маса консервується. Основну роль у процесі силосування виконують молочнокислі бактерії, джерелом харчування для яких служать водорозчинні вуглеводи, тому вміст таких речовин в кормі

визначає його здатність до силосування.

До складу трави входять структурні вуглеводи (геміцелюлоза, целюлоза), що формують рослинні волокна, і запасні вуглеводи (ферментовані цукри). У травах помірного поясу волокна становлять 30–40 % сухих речовин, основні запасні вуглеводи, фруктани – 5–7 % сухих речовин, справжні ферментовані цукри (фруктоза, глюкоза, сахароза) – близько 10 % сухих речовин. У бобових основний запасний вуглевод – крохмаль. Кількість і тип вуглеводів, присутніх у травах, залежить від виду трав, погодиних умов у період зростання та застосовуваної агротехніки вирощування. Найкраще силосуються трави з високим вмістом ферментованих цукрів і низьким – волокон, тобто на ранній стадії зростання.

У процесі дозрівання і зберігання силосу рослинна маса зазнає ряд стадій трансформації, обумовлених послідовним розвитком різних мікроорганізмів, що споживають, насамперед, доступні вуглеводи (справжні ферментовані та запасні). Цей мікробіологічний процес можна представити як сукцесію в екосистемі – силосній масі. У класичному (так званому холодному способі) силосування виділяють 4 стадії (рис. 2.11).

I. Аеробна стадія

На цій стадії спостерігається споживання атмосферного кисню, що залишився в сировині, рослинними ферментами; розмноження аеробних бактерій, що входять до складу епіфітної мікрофлори силосованих рослин. Стадія нетривала.

II – IV. Анаеробні стадії

II. *Розвиток молочнокислих стрептококів та ентеробактерій.* Ці мікроорганізми найбільш фізіологічно активні при рН 5,0–6,5, характерному для силосованої маси, що закладається, тому вони починають розвиватися на ранній стадії силосування. В результаті перетікання анаеробних процесів бродіння в рослинній масі накопичуються молочна та оцтова кислоти. Стадія нетривала.

III. *Розвиток лактобацил.* Ця фаза найбільш тривала і є визначальною в дозріванні силосу. У силосуванні беруть участь молочнокислі бактерії *pp. Lactobacillus, Pedicoccus, Streptococcus, Leuconostoc*. У деяких випадках, зокрема при гарячому способі силосування, при якому температура силосу може підвищитися до 60–65 °С, в ньому може накопичуватися молочна кислота, що продукується деякими термотолерантними бактеріями, наприклад *Bacillus subtilis*.

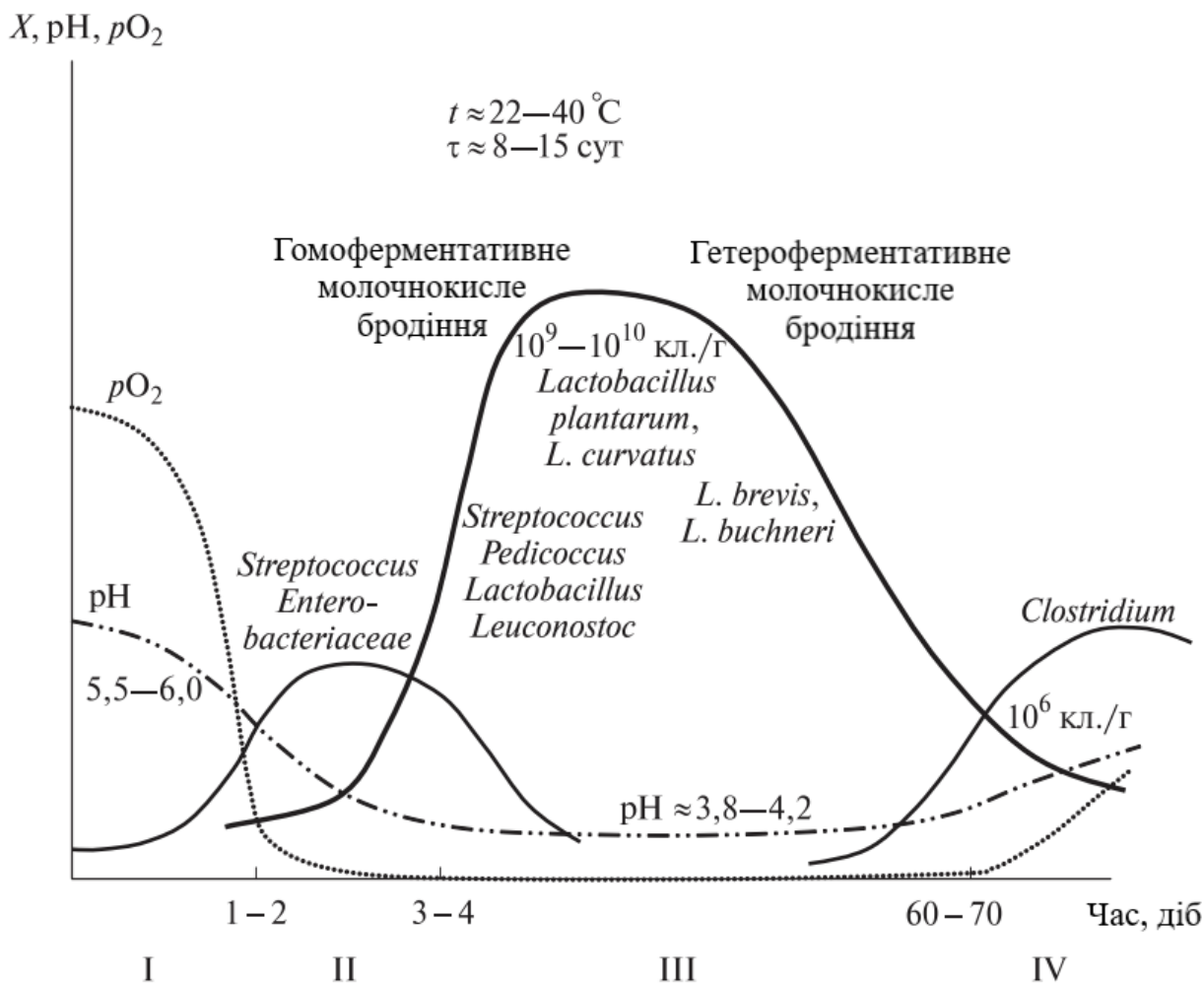


Рис. 2.11. Розвиток мікробного комплексу при дозріванні та консервації силосу холодним способом

У міру дозрівання силосу рН падає нижче 5,5, у силосній мікрофлорі починають домінувати лактобацили. Спочатку розмножуються гомоферментативні лактобацили (*Lactobacillus plantarum* і *L. curvatus*), що здійснюють гомоферментативне бродіння цукрів з утворенням молочної та оцтової кислоти:



В процесі такого бродіння втрат сухих речовин немає, втрати енергії незначні. До кінця цієї стадії починають домінувати гетероферментативні види

(*L. buchneri*, *L. brevis*), що зброджують цукри з утворенням молочної кислоти та етанолу і витримують більш високі концентрації оцтової кислоти, що накопичується:



Під час гетероферментативного бродіння спостерігаються втрати сухої речовини – близько 20%.

У природній мікрофлорі переважають гетероферментативні молочнокислі бактерії.

У процесі силосування внаслідок утворення молочної та оцтової кислот *pH* поступово знижується та стабілізується на рівні 3,8–4,2. Концентрація молочнокислих бактерій досягає 10^9 – 10^{10} кл./г силосної маси на 8–15-ту добу силосування, температура підвищується до 22–40 °С. За умови вмісту молочної кислоти, достатнього для пригнічення мікроорганізмів, створюються умови для консервації силосу. Корм, більш-менш спресований і ізольований від доступу повітря, підданий силосуванню, набуває приємних для тварин смакових якостей, стає м'якшим, дещо змінює колір (буре забарвлення), але залишається соковитим і добре засвоюється організмом тварини.

Після консервації у міру зберігання силосу приблизно протягом 60 діб кількість мікроорганізмів поступово знижується і досягає 10^6 кл./г, *pH* цей час поступово зростає.

IV. *Розвиток бактерій р. Clostridium*. Ці бактерії починають розвиватися в силосі при *pH* > 5,0, використовуючи вуглеводи, що залишилися, молочну кислоту і амінокислоти силосу, утворюють масляну кислоту, яка є слабшою, ніж молочна, і аміак. В результаті поступово знижується кислотність і інтенсивніше розвиваються гнильні мікроорганізми, що призводить до псування силосу.

Силосування проводять у ямах, траншеях, буртах чи силосних вежах. За наявності на фермі кормоцеху силосні споруди знаходяться біля них. Найбільш поширеним є силосування у траншеях. Траншеї влаштовують по можливості на піднесеному місці, на майданчиках з ухилом для стоків поверхневих вод, з доступом для транспортних засобів. Вони закладають від 250 до 3000 т силосу. Наземні траншеї споруджують на ділянках з рівним рельєфом та високим рівнем ґрунтових вод (рис. 2.12). Вони мають висоту не більше 3 м. Заглиблені та напівзаглиблені траншеї, глибиною не менше 3 м, влаштовують на ділянках із низькопроникними глинистими, суглинними ґрунтами з порівняно низьким рівнем ґрунтових вод.

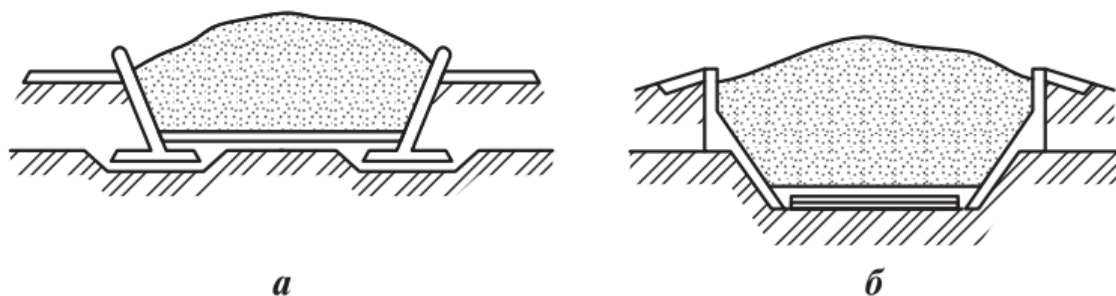


Рис. 2.12. Схема траншей для силосування: а – наземні траншеї; б – напівзаглиблені траншеї

Стіни та днища траншей виготовляють із бетону, залізобетону, цегли, збірних залізобетонних елементів. Торці наземних траншей після закладки силосу закривають дерев'яними щитами або пакунками з соломи, стіни, що виступають над поверхнею землі, утеплюють вийнятим ґрунтом. Для стоку атмосферних і дренажних вод біля силосних споруд влаштовують канали.

При закладці силосу важливо створити анаеробні умови, забезпечити домінування молочнокислих бактерій (їх загальна кількість має бути 10^5 – 10^6 кл./г силосної маси). Крім того, рослинна сировина має містити багато сухих речовин і особливо редукуючих речовин (цукорів). У районах з помірним кліматом вміст цукрів у рослинній масі нижчий, за таких умов домінують гетероферментативні молочнокислі бактерії.

На силос закладають масу із 25–30 % сухої речовини. Якщо вміст сухих речовин < 25 %, використовуються добавки сухих кормів і силосні добавки для досягнення хорошої ферментації та зменшення втрат силосу.

Один із варіантів силосування – *приготування сінажу*. У цьому випадку біологічному консервуванню в силосних спорудах піддається подрібнена рослинна маса, попередньо підсушена (підв'ялена) з вмістом 35–45 % сухої речовини. Відносна сухість, створювана в сінажі, уповільнює розвиток молочнокислих бактерій, а також згубний вплив на зростання небажаних мікроорганізмів. Зокрема у США набуло поширення приготування *спеціальних силосів* з сумішей різних відходів тваринництва та рослинництва, наприклад, із сумішей:

- 57 % коров'ячого гною та 43 % сіна;
- 42 % подрібненої кукурудзи, 12 % куку-рузного силосу та 40 % свинячого гною;
- 40 % гною великої рогатої худоби, 12 % сінної нарізки та 12 % дробленої кукурудзи.

Такі силосовані відходи згодуються вівцям та козам.

Можливі два способи силосування: холодний та гарячий.

Холодний спосіб силосування більш поширений, що пояснюється як його порівняльною простотою, так і гарною якістю одержуваного корму. При холодному способі силосування скошену рослинну масу, якщо потрібно, подрібнюють, укладають повністю в кормовмістище, утрамбовують, зверху якомога щільніше вкривають для ізоляції від повітря. Дозрівання силосу йде при помірному підвищенні температури максимум до 40 °С; оптимально за 25–30 °С. Загальні втрати сухих речовин корму при холодному силосуванні не перевищують 10-15%.

Гарячий спосіб силосування використовується для квашення грубостебельчастих малоцінних кормів, які після обробки за підвищеної температури краще поїдаються худобою. У цьому випадку споруду заповнюють частинами. Зелену масу на один-два дні пухко укладають шаром близько 1,0–1,5 м. При значній кількості повітря в ній починають розвиватися аеробні процеси, що супроводжуються великим виділенням тепла, в результаті чого температура подрібненої сировини піднімається до 45–50 °С. Потім вкладають другий шар сировини такої ж товщини, як і перший, і він у свою чергу піддається розігріванню. Рослини, що знаходяться внизу і вже розм'якшені під впливом високої температури, спресовуються під вагою нового шару корму, при цьому повітря з нижнього шару силосу видаляється, аеробні процеси в ньому припиняються і температура знижується. Так шар за шаром заповнюють все силосховище. Верхній шар корму утрамбовують і вкривають для запобігання доступу повітря. У зв'язку з тим, що силосховища при гарячому способі силосування зазвичай роблять невеликих розмірів, на верхній шар корму, що силосується, поміщають вантаж. Аеробні процеси призводять до окислення частини речовин до CO_2 і H_2O , що призводить до втрати значної кількості поживних речовин корму – до 30 % і більше, різко зменшується здатність до перетравлювання білків. Тому гаряче силосування не може вважатися раціональним способом збереження рослинної маси.

Якщо вміст сухих і редукуючих речовин невисокий, силосна маса погано утрамбована і прихована і забезпечується великий доступ кисню, то *pH* системи не знижується до значень консервації 4,0–4,2, у силосній масі розвиваються ентеробактерії та клостридії, які утилізують молочну кислоту, білок, залишкові цукри, що призводить до втрати харчової цінності силосу. Замість молочної кислоти може накопичуватися масляна, яка є слабшою за молочну. Сгодовування такого недоброякісного силосу коровам, молоко яких йде на сир, викликає в сирі подібне маслянокисле бродіння.

Якщо в силосній масі невисокий вміст молочнокислих бактерій, то за анаеробних умов можуть розвиватися дріжджі, утворюючи етанол і CO_2 . Втрата

речовини силосу зростає, консервація не відбувається. Дріжджі можуть активно розвиватися в аеробних умовах, коли силос відкривають для годування тварин.

Аеробне псування силосу на поверхні бурти може бути дуже швидким і призводить до повної втрати поживності силосу. За умови високого вмісту в сировині бобових для досягнення необхідного *pH* потрібно більше молочної кислоти через високу буферну ємність білків бобових. Тому більшість бобових рослин важко силосується, адже у них відносно мало цукрів (3–6 % сухих речовин) та багато білка (20–40 % сухих речовин).

Внесення азотних добрив перед скосом трави може збільшити вміст амонійного і нітратного азоту в трав'яній масі. При вмісті загального азоту >100 г/кг важко досягти значень *pH* до рівня, що інгібує активність клостридій. Крім того, за рахунок нітратредукції



відбувається підвищення *pH* до 5,0 і вище, в результаті починається розвиток клостридій.

Про якість силосованого корму можна судити за складом органічних кислот, що накопичилися під час бродіння (табл. 2.3). Силос гарної та високої якості має наступний усереднений склад:

- сухі речовини – 20–23 %;
- амонійний азот – 7–10 % від загального азоту;
- сирий протеїн – 14–16 % від сухих речовин;
- сирий протеїн, що перетравлюється, – 80–110 г/кг від сухих речовин;
- *pH* – 4,0–4,2.

Таблиця 2.3. Приблизне співвідношення кислот у силосі різної якості

Якість силосу	<i>pH</i> середовища	Співвідношення кислот
Дуже висока	<4,2	молочна >60%, оцтова <40%, масляна – 0%
Висока	<4,5	молочна 40–60%, оцтова 60–40%, масляна – сліди
Середня	близько 4,5	молочна 40–60%, оцтова 60–40%, масляна – до 0,2%
Погана	>4,7	молочна – мало, масляна – переважно
Дуже погана	>5,5	переважають леткі кислоти, у тому числі й масляна

Для досягнення задовільної ферментації та зменшення втрат силосу часто використовують силосні добавки. Силосні добавки можуть бути інгібіторами і стимуляторами ферментації.

Інгібітори – кислотні добавки (сірчана та суміш сірчаної та соляної кислот, мурашина, сорбінова кислоти, суміші органічних кислот: мурашиної,

оцтової, пропіонової) та консерванти (формальдегід, параформальдегід).

Стимулятори – джерела вуглеводів (патока, барда), молочнокислі бактерії, ферменти.

Кислоти важко рівномірно розподіляти в товщі силосної маси, тому частина силосу може мати підвищену кислотність. Силос із $pH < 3,0$ неприємний для тварин і викликає ацидоз у рубці (оптимальне значення pH силосу 3,6–4,0). З цієї причини використання кислотних добавок є не дуже ефективним. Крім того, неорганічні кислоти є корозійно агресивними.

Мурашина кислота слабша за неорганічні кислоти, вона знижує значення pH нижче 4,0, якщо додавати її в концентрації, пропорційній вмісту сухих речовин. Мурашина кислота має антибактеріальну активність за рахунок поєднання закисляючої дії та бактерицидності самої недисоційованої кислоти. Вона інгібує зростання клостридій, ентеробактерій та деяких штамів стрептококів та педіококів. При цьому розвиток лактобацил пригнічується не повністю. Однак застосування мурашиної кислоти не завжди дає стійкий ефект при силосуванні, деякі дріжджі стійкі до мурашиної кислоти і іноді починають активно розвиватися при відкритті буртів для використання. До 50 % мурашиної кислоти може бути втрачено в процесі силосування, що також призводить до поганої консервації силосу.

Оцтова та пропіонова кислоти слабші, ніж мурашина, тому як консерванти вони використовуються лише в суміші з останньою.

Додавання *сорбінової* кислоти призводить до придушення процесів аеробного розкладання та ефективно, якщо існує небезпека активного перебігу їх у силосній масі.

Формальдегід використовують у вигляді 40 % розчину (формаліну), яким обприскують силос. Помірні добавки формальдегіду захищають рослинні білки від мікробної атаки. Однак при польовому застосуванні його втрати можуть бути високі через летючість: у силосних ямах через 100 днів залишається лише 20 % від вихідного вмісту формальдегіду, що призводить до псування силосу. Використання підвищених доз формальдегіду погіршує якість і перетравлюваність білків. Вільний формальдегід може переноситися в молоко. Оптимально використання суміші формальдегіду та мурашиної або сірчаної кислоти.

Параформальдегід є більш стійким і перешкоджає інтенсивному руйнуванню білків, інгібуючи переважно маслянокисле бродіння, а не всю силосну мікрофлору.

До добавок, які активно стимулюють ферментаційні процеси в силосі,

відносяться *патока* та *барда*. Вони збільшують вміст сухих речовин та молочної кислоти та зменшують внаслідок цього *pH*. Добавки вносять у кількості близько 50 г/кг силосної маси. При таких дозах не всі доступні вуглеводи перетворюються на молочну кислоту лактобацилами, і до кінця ферментації зберігається досить високий залишковий рівень водорозчинних вуглеводів. Високий вміст фруктози в патоці сприяє зростанню гетероферментативних бактерій, що зменшує кількість молочної кислоти в силосі і викликає нестабільність молочнокислого бродіння.

Найкращими вважаються біологічні добавки на основі молочнокислих бактерій та ферментів. Такі добавки сприяють швидкому розвитку молочнокислого бродіння, домінуванню насамперед гомоферментативних молочнокислих бактерій над місцевою силосною мікрофлорою та підтримці низького значення *pH* протягом усього періоду утворення та збереження силосу.

Застосування заквасок чистих культур молочнокислих бактерій особливо результативне при силосуванні рослин, що важко силосуються. Для силосування використовують окремо або спільно штами, що мають значну ферментативну активність: *Lactobacillus plantarum*, *L. pentoaceticus*, *L. pentosus*, *L. salivarius*, *Streptococcus lactis diastaticus*, *S. faecium*, *Pediococcus acidilactis*, *Propionibacterium shermanii*, *Enterobacter spp.* та ін. Ефективні, наприклад, добавки *L. plantarum* (активне зростання при *pH* < 5,0) спільно з добавками *Pediococcus* та *Streptococcus spp.* (активні при *pH* від 5,0 до 6,5 – тобто на ранній стадії силосування) у співвідношенні 3 : 1. Такі добавки викликають швидке падіння *pH* за 24 год. Цим зберігається енергетична та білкова цінність силосу: інгібується зростання *Clostridium spp.*, накопичення грибних токсинів і обмежується зростання гетероферментативних бактерій. Хороші результати досягаються при використанні препаратів, до складу яких входить *S. faecium* або *S. lactis* разом із лактобацилами. При годівлі тварин силосом, приготованим з використанням цих бактерій, краще пригнічується зростання шкідливих мікроорганізмів у кишечнику, зростають прирости ваги.

Закваски молочнокислих бактерій готують глибинною ферментацією з наступним відділенням клітинної маси та її висушуванням. Як поживне середовище застосовуються знежирене або гідролізоване молоко, відходи молочної промисловості: підсирна, сирна і казеїнова сироватки, а також пивна дробина, кислотні або ферментативні гідролізати солодових паростків, житнього та горохового борошна та ін. Закваски отримують у рідкому вигляді або висушені.

Бактеріальний концентрат лактобацил *пастоподібної* консистенції з залишковою вологістю 70–72 % містить $(0,5–1,0) \cdot 10^{11}$ життєздатних клітин на 1 г концентрату. Його зберігають за 4–6 °С. Тривале зберігання пастоподібного концентрату неможливе, його необхідно висушувати або зберігати в замороженому вигляді.

Хорошим живильним середовищем для розмноження культур молочнокислих бактерій, призначених для *висушування*, є стерильне знежирене молоко з підвищеним вмістом сухих речовин (до 16 %), що досягається додаванням сухого молока і 0,1 % лимоннокислого натрію. Процес розмноження бактерій здійснюється без аерації за температури 30 °С протягом 12–16 год для молочнокислих стрептококів і при 40 °С протягом 6 год для молочнокислих бацил. Потім культуральну рідину нейтралізують 20 % розчином NaOH до вихідної кислотності середовища. Рідку закваску висушують у розпилювальній сушарці при температурі повітря, що надходить 130–140 °С. У зоні розпилення температура має перевищувати 48–50 °С. Залишкова вологість сухої закваски 5–7 %. Виживання стрептококів при сушінні в таких умовах 18–33 %, ацидофільних паличок – 7–8 %.

Найбільш висока якість сухих заквасок забезпечує *ліофілізація* біомаси із застосуванням спеціальних *захисних середовищ*.

Педіококи і *стрептококи* менш вимогливі до складу живильного середовища, ніж лактобацили, ростуть у ферментерах до більшої щільності, краще витримують ліофілізацію і більш стабільні за звичайних умов зберігання на фермі, тому їх отримання в промислових умовах дешевше, ніж лактобацил.

Біологічні силосні добавки другого покоління включають, окрім молочнокислих бактерій, мікроорганізми з амілолітичною та целюлазною активностями, ферменти гідролізу запасних полісахаридів до гексоз та пентоз, які можуть бути засвоєні молочнокислими бактеріями. Однак такі добавки не гідролізують лігнін в умовах силосування. Також використовуються біологічні добавки, які містять лише ферменти (целовіридин ГЗх, целоконігін П10х та ін.). Целюлолітичні та гемоцелюлолітичні ферменти, що містяться в цих добавках, перетворюють запасні полісахариди трави на доступні вуглеводи, які потім використовуються молочнокислими бактеріями, присутніми в силосі.

2.3. Компостування

Компостування – екзотермічний процес біологічного окислення, в якому органічний субстрат піддається аеробної біодеградації змішаною популяцією

мікроорганізмів в умовах підвищеної температури та вологості.

У процесі біодеградації під дією природної мікрофлори – *мезофільних* і *термофільних* бактерій – окислюється до 60 % органічної речовини, органічний субстрат, що залишився, зазнає фізичні і хімічні перетворення, що супроводжуються утворенням гумифікованого кінцевого продукту. У ході компостування матеріал, що переробляється, розігрівається до температури 60–80 °С, при якій гинуть личинки і лялечки комах, нематоди, яйця гельмінтів і хвороботворні неспоруютворюючі мікроорганізми, насіння бур'янів. Отриманий компост являє собою сипкий матеріал меншого об'єму, ніж вихідний, вологістю 40–50 %, стабілізований за біологічними показниками і зазнає лише повільного розкладання, оскільки вміст в ньому легкодоступних поживних речовин, що використовуються більшістю мікроорганізмів, істотно знижено в результаті окислення та мінералізації.

За допомогою компостування різні малотоксичні, але забруднюючі довкілля органічні відходи переробляються на більш стабільні та/або менш токсичні матеріали, позбавлені неприємного запаху. Як спосіб переробки шкідливих відходів та зменшення вмісту забруднень компостування в даний час застосовують для утилізації та знезараження активного мулу та опадів очисних споруд, гною, посліду, переробки твердих побутових відходів після їх попереднього сортування, для очищення ґрунтів та інших матеріалів, забруднених нафтою, пестицидами, поліциклічними ароматичними вуглеводнями (ПАВ), поліхлорованими біфенілами (ПХБ) та іншими органічними поллютантами.

Компостуванням отримують цінні для сільського господарства органічні добрива та засоби, що покращують структуру ґрунту. Велике поширення також знайшло отримання штучного ґрунту за допомогою компостування та його використання в біоінтенсивному землеробстві. Компости можуть використовуватися для вирощування грибів, як основні добрива на городах, садових ділянках і т. д. Компостування – економічний і рентабельний спосіб отримання енергії з сільськогосподарських відходів. Тепло, що виділяється при компостуванні, можна застосовувати для нагрівання повітря та води до 50–55 °С та опалення парників.

Компостування різних відходів у промислових масштабах найбільш широко застосовується у країнах Європи та США. Отримані органічні добрива використовуються під час вирощування різних сільськогосподарських культур, у садівництві та овочівництві. В Україні компостування застосовується у менших масштабах. На кількох сміттєпереробних заводах тверді побутові

відходи компостують разом із опадами стічних вод, при цьому з 1 млн т відходів одержують у середньому 360 000 т компостів. Витрати під час отримання таких компостів досить значні, оскільки ТПВ, що надходять переробку, або вже готовий компост потрібно сортувати. Є досвід і великомасштабного польового компостування відходів тваринницьких ферм.

Виділяють 4 стадії компостування (рис. 2.13):

I – мезофільну,

II – термофільну,

III – остигання,

IV – дозрівання.

Тривалість стадій I–III кілька діб та тижнів, стадії IV – кілька місяців.

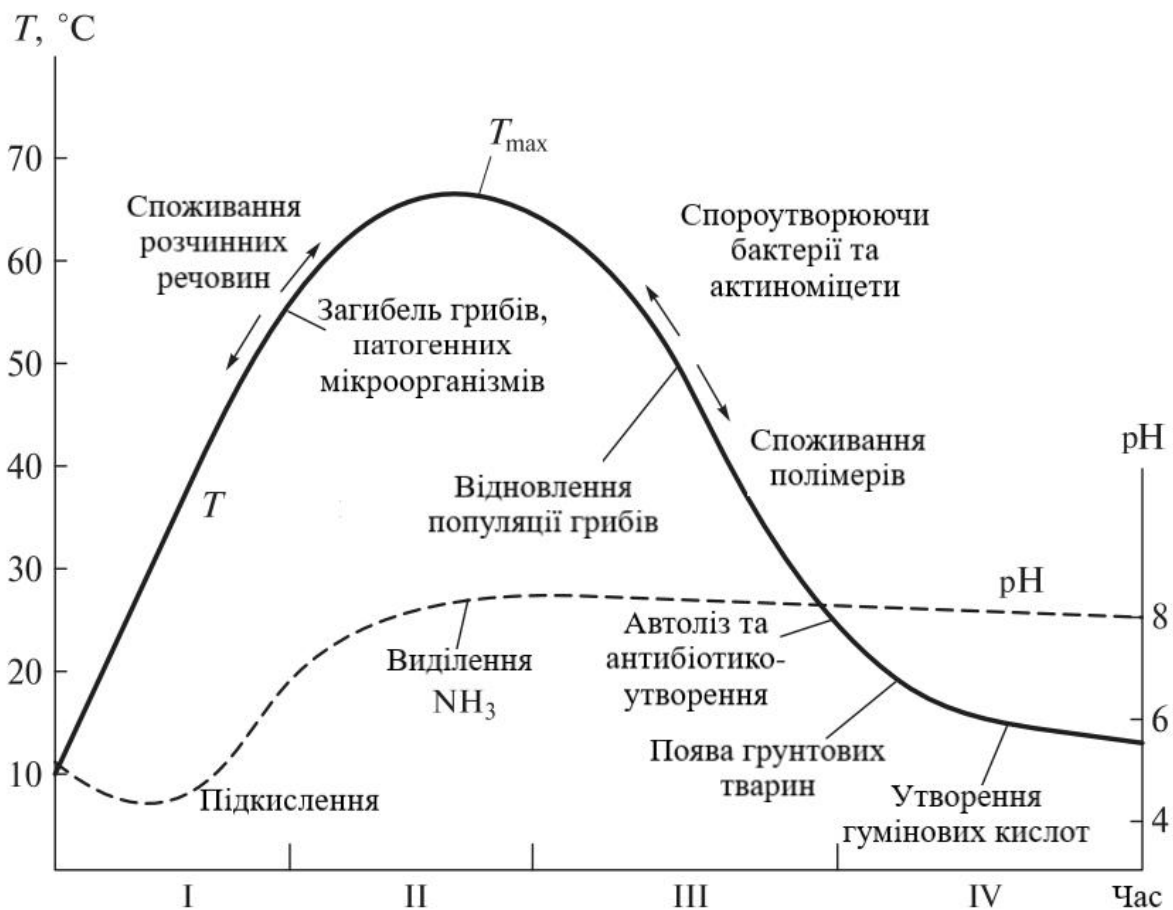


Рис. 2.13. Стадії компостування

На *першій* стадії починають розвиватися мезофільні мікроорганізми. В результаті перетікання аеробних процесів окислення органічного субстрату тепла виділяється набагато більше, ніж у ході анаеробних процесів (зокрема, під час силосування), температура всередині компостованої суміші починає поступово підвищуватися з 10–15 до 30–45 °С.

При досягненні температури 40–45 °С настає друга стадія компостування, сприятлива для розвитку термофілів. Через перетікання процесів амоніфікації та виділення аміаку починає підвищуватися *pH*. У природних умовах термофіли активно розвиваються при саморозігріванні різних органічних субстратів (вологого сіна, торфу, зерна, гною, прілого листя тощо). Умови, сприятливі для розвитку термофільних бактерій, зберігаються недовго, тому подібні бактерії, будучи ефемерами, зазвичай утворюють спеціалізовані клітини, що покояться – *ендоспори*, здатні зберігатися в навколишньому середовищі протягом дуже довгого часу. Інтенсивність обміну у термофілів вище, ніж у мезофілів, і при їх розвитку температура зростає особливо швидко, досягаючи максимальних значень 70–80 °С. Гриби та патогенні бактерії, організми мезофауни, насіння бур'янів гинуть, термофільні бактерії спорулюють і в такому стані зберігають свою життєздатність.

На наступній, *третьій* стадії, після споживання субстрату, що легко розкладається, швидкість окислення починає падати в міру того, як до нього залучаються більш стійкі субстрати; температура всередині компостованої маси знижується, *pH* повільно зменшується, але залишається лужним. У міру охолодження спочатку відновлюються популяції спороутворюючих бактерій і бактерій-актиноміцетів, потім грибів. Розвиток актиноміцетів супроводжується утворенням антибіотиків, які пригнічують багато бактерій, у тому числі гнильні та мікобактерії, що сприяє, поряд з температурним впливом, *зnezараження* компостованого матеріалу.

На заключній, *четвертій* стадії, дозрівання, дефіцит поживних речовин та зміна домінуючої мікрофлори призводять до лізису частини мікробних клітин, з'являються ґрунтові тварини. Органічні речовини, що залишилися, залучаються в складні реакції між залишками рослинних полімерів і продуктами розкладання, що призводять до утворення *гумінових кислот*.

Найбільш сприятливі умови для розігріву субстрату створюються в пухких зволжених купках. Тепло, що виділяється у великих купках, може нагріти масу до 80–90 °С. Хімічні реакції, що при цьому перетікають, можуть призвести до обуглювання і навіть займання маси.

Компостування проводять у буртах, грядках, купках, штабелях на відкритих майданчиках, ямах, траншеях з ізольованим дном чи спеціальних ємностях. Можлива також і механізована переробка (у колодязях, відсіках, тунелях, ангарах, силосах, зброджувачах та барабанах, біореакторах). Оскільки вартість компосту низька, застосовують недорогі, але надійні системи компостування. Тривалість компостування в таких системах залежить від низки умов: клімату,

виду матеріалів, що переробляються, ступеня подрібнення і тривалості зберігання компостної маси, вологості, умов аерації.

Для компостування важливо оптимальне співвідношення вуглецю, азоту і фосфору в масі, що закладається. Співвідношення вуглецю до азоту повинно знаходитися в межах 20 : 1 – 30 : 1. Зміст фосфору повинен становити 0,5–1,0 % від сухих речовин компосту. Тому під час компостування змішують різні компоненти. Одні з них багаті азотом та фосфором і містять органічні сполуки, що легко розкладаються (гній, курячий послід, фекалії, активний мул), інші ж бідні азотом і фосфором, слабо розкладаються, але мають високу вологоємність (рослинний опад, листя, деревина, солома, торф, тріска, кора, папір, картон, бавовняні тканини, тверді побутові відходи тощо). Неорганічні відходи (скло, метал, пластмасу та ін.), великі фрагменти сміття перед компостуванням бажано видаляти.

Приблизні співвідношення C : N в органічних відходах, що здатні до компостування:

- сечовина – 0,43;
- трава, бур'яни – 20;
- висушена кров – 3;
- тверді покидьки – 35;
- нечистоти, фекалії – 8;
- листя – 60;
- сирий активний мул – 8;
- пшенична солома – 80;
- кісткове борошно – 8;
- рисова солома – 100;
- гній – 14;
- сира тирса – 500;
- відходи пивоваріння – 15;
- папір >1000;
- водяний гіацинт – 16.

Змішують, наприклад, активний мул з ТПВ, шлам стічних вод або курячий послід з корою, гній або пташиний послід з торфом у співвідношенні від 1 : 1 до 1 : 3, опади стічних вод, ТПВ, гідролізний лігнін, торф, сільськогосподарські відходи і т. ін.

Якщо відношення C : N > 30 : 1, то спостерігаються підвищені втрати вуглецю. Якщо в перероблюваному субстраті низький вміст фосфору і калію, то їх додають у компостну масу у вигляді мінеральних солей, золи. При дефіциті

азоту в компостну масу можна додавати азотні добрива (сечовину, амонійні, нітратні солі). Внесення нітрату амонію більш доцільне, ніж внесення сечовини, оскільки під час її використання *pH* компостної маси з часом збільшується, виділяється аміак і втрачається азот. Втрати азоту (у вигляді NH_3) при компостуванні в середньому становлять 5–20 % і збільшуються при $\text{C} : \text{N} < 20 : 1$. При надлишку азоту втрата його у формі NH_3 може бути частково пригнічена додаванням надлишкової кількості фосфатів, внесенням сорбентів цеолітів та ін. Однак внесення мінеральних солей і сорбентів призводить до подорожчання процесу.

Матеріали з великим вмістом вологи необхідно змішувати з твердим матеріалом, що сорбує вологу, який забезпечить суміш додатковим вуглецем і створить потрібну для аерації структуру суміші. Доцільно додавати торф, соломку злаків, тріски, сміття, листя. Торф має хороші поглинальні і антисептичні властивості, здатний утримувати поживні речовини, поглинає аміак, що виділяється. При використанні кислого торфу в компостну суміш необхідно додавати крейду або вапно.

Розміри компостних куп, гряд, штабелів, бурт мають забезпечувати необхідну вологість, температуру та аерацію всередині компостованої маси. При висоті менше ніж 1,5 м компостна маса швидко підсихає, втрати тепла є суттєвими, температурний режим біодеградації порушується. Усе це погіршує компостування. При висоті компостного ряду більше 3–4 м відбувається порушення природної аерації, тривалість компостування збільшується, зростає вміст проміжних низькомолекулярних речовин біодеградації, якість компосту падає.

У великих кучах температура може досягати 80–90 °С. Занадто висока температура всередині купи, що розігрівається, пригнічує зростання мікроорганізмів: дуже небагато видів зберігають активність за температури > 70 °С; швидкість біологічних процесів і подальше дозрівання компосту падають. Однак температура понад 55–60 °С є корисною для боротьби з термочутливими патогенними мікроорганізмами. Тому оптимальною є температура 55–65 °С, коли, з одного боку, гине патогенна мікрофлора, з другого – розвивається мікрофлора, відповідальна за деградацію біополімерів. Для підтримки оптимальної температури організують випарне охолодження за допомогою примусової аерації.

Аерація є необхідною для біологічного окислення органічних речовин, видалення CO_2 , H_2O та теплоти. Природна аерація не дозволяє створити оптимальні умови для компостування: час компостування збільшується,

внаслідок чого знижується якість компосту. У таких випадках компостну масу необхідно періодично розпушувати. Потреба в кисні змінюється протягом процесу: вона низька в мезофільній стадії, зростає до максимуму в термофільній стадії і мінімальна під час охолодження та дозрівання. У механізованих швидких системах компостування передбачається автоматичне регулювання подачі повітря і зрошення в залежності від температури і вологості всередині компостної маси.

Варіант організації типової компостної гряди наведено на рис. 2.14.

Аерація компостованого матеріалу в такій багатошаровій гряді здійснюється за допомогою вертикальних або прокладених по дну гряди перфорованих труб повітрям під вакуумом або тиском, що створюється вентилятором або компресором. Основа багатошарової гряди має дренажний стік для відведення надлишку вологи.

Штабелі та бурти з примусовою аерацією формуються висотою до 4–5 м. Форма штабеля трапецієподібна з шириною поверху 2–30 м. Витрата повітря становить 0,4-0,9 м³ на 1 м² штабеля на годину при швидкості руху повітря 0,2–0,4 мм/с.



Рис. 2.14. Схема компостної гряди

Оптимальні значення параметрів при компостуванні у купах, грядках, штабелях, буртах представлені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Оптимальні значення параметрів при компостуванні в купах, грядках, штабелях, буртах

Параметр	Оптимальне значення
Співвідношення С : N	20 : 1 – 30:1
Вміст сухих речовин	30–50 %
Вміст органічної речовини в компостованій масі	Не менш, ніж 50 % від сухих речовин
Вологість	50–70 % (великі значення можливі за умови використанні наповнювачів)
Вільний обсяг	30 %
Аерація	0,6–1,8 м ³ повітря/добу на 1 кг леткої частини твердих речовин, підтримання концентрації кисню в газовій фазі в межах 7–18 %
Температура	55–65 °С
pH середовища	6,0–8,0
Розмір часточок	10–60 мм, оптимальний – до 15 мм для систем із перемішуванням та примусовою аерацією; 50 мм для компостних гряд у разі природної аерації
Перемішування	Без перемішування, при періодичному розпушуванні 1–3 рази на тиждень протягом трьох тижнів у простих системах; короткі періоди енергійного перемішування в механізованих системах
Розміри гряд	Будь-яка довжина, висота 1,5–3,0 м і ширина 2,0–7,0 м для гряд, буртів та компостних куп з природною аерацією; у разі примусової аерації розміри мають перешкоджати перегріву

Для окислення білкового матеріалу витрачається близько 1,5 кг O₂/кг органічного субстрату з виділенням тепла близько 14,2 МДж/кг O₂ (близько 21 МДж/кг органічної речовини) при швидкості виділення 20–30 Вт/кг сухої речовини. Тепла, що виділяється під час окиснення 1 кг органічної речовини, вистачає для випаровування 5 кг вологи. Частина вологи видаляється з допомогою природного випаровування.

Попереднє подрібнення збільшує поверхню субстрату і швидкість компостування, проте потребує енергетичних витрат. Енергетичні витрати на подрібнення становлять: при подрібненні до 50 мм – близько 8 Вт·год/кг; до 12,5 мм – близько 20 Вт·год/кг.

При польовому компостуванні в штабелях (буртах) на відкритих майданчиках приготування компостів проводять за нормальної температури зовнішнього повітря не нижче -5 °С. Майданчики мають бути обвалованими, водонепроникними, наприклад, з асфальтовим або бетонним покриттям, що розраховується на навантаження від застосовуваних механізмів і маси штабелів,

з дренажними системами. Рівень залягання ґрунтових вод не має бути вищим 1–1,5 м, щоб компостовані продукти не забруднювали ґрунтові води. Санітарна зона для дрібних житлових масивів складає 500 м.

Для приготування компостної суміші, змішування її з наповнювачами та перемішування, прибирання готового компосту можуть застосовуватися навантажувачі, траки, трактори, збиральні машини, бульдозери. Бурти укладаються у вигляді піраміди, тригранної призми або трапеції в перерізі на майданчику з теплоізоляційною подушкою (наприклад, з торфу) з кутом природного укосу бокових сторін бурта 35–45 °. Компоненти укладають шарами по 5–15 см, уникаючи ущільнення. При завершенні побудови бурта на його поверхню для зниження тепловтрат і запобігання поширенню запаху і мух наносять теплоізоляційний шар товщиною 5–20 см у літній період, а в зимовий до 30–40 см. Як теплоізолюючий матеріал підходять готовий компост, солома, тирса, торф. Через кожні 2–4 тижні бурти звожують. Процес компостування в добре прихованих буртах продовжується і в зимовий час. Загальна тривалість компостування у буртах та штабелях зазвичай становить від 1,5–2 до 3–6 місяців залежно від кліматичних умов та пори року.

Перемішування компостної маси і примусова аерація за допомогою каналів або труб, розташованих під компостованим матеріалом, зменшують анаеробні зони; періодичне розпушування диспергує великі фрагменти сировини, що збільшує питому поверхню, забезпечує переробку більшої частини сировини в термофільних умовах і прискорює дозрівання компосту. Суміш у буртах перемішують протягом 30–45 діб кілька разів (через 6–8 діб). Надмірне перемішування викликає охолодження і висихання компостованої маси, розриви в міцелії актиноміцетів і грибів або руйнування структури сировини і перетворення його на вологу гомогенну масу.

Після закінчення компостування ступінь переробки органічної речовини становить 40–60 %, вологість маси знижується до 25–50 %, зольність підвищується до 20–75 % і суттєво зменшується її обсяг.

Типовий склад компосту (% від сухої маси):

- органічні речовини – 25–80;
- карбон – 8–50;
- нітроген – 0,4–3,5;
- фосфор – 0,1–1,6;
- калій – 0,4–1,6;
- кальцій (у вигляді CaO) – 0,7–1,5;
- *pH* компосту – 6,5–7,5.

Необхідно контролювати рівень важких металів у компості.

Компост можна вносити в ґрунт як добрива кожні 3–4 роки (якщо вміст важких металів у ньому не перевищує норму). Типові норми внесення компосту – 5–10 т/га по сухій речовині. Компост із вмістом важких металів, що перевищує норми для добрив, може використовуватися при планувальних роботах, у садово-парковому, лісовому та придорожньому господарствах, а також рекультивації земель, відсипанні полігонів ТПВ.

Поживні речовини виділяються з компосту повільніше, ніж легко-розчинних неорганічних добрив, тому дія компосту може тривати кілька років.

Польове компостування в купах, буртах вимагає великих площ і триває залежно від біодоступності субстрату, що використовується для механізації перемішування та системи аерації від 3 тижнів до 1,5 років. У великих масштабах цей метод неможливо застосовувати поблизу населених пунктів.

Компостування можна проводити в закритих вентильованих приміщеннях. У цьому випадку зменшується його залежність від погодних умов, простіше забезпечити аерацію компостної маси, дезодорацію використаного повітря та газів, що виділяються. Складування компосту може здійснюватися за межами приміщення.

Прискорити компостування можна, використовуючи спеціалізовані добавки хімічних речовин та/або мікроорганізмів, передпідготовку субстрату, спрямовану температурну дію або механізовані технології та системи.

Хімічні добавки і спрямований температурний вплив активізують життєдіяльність мікрофлори, що бере участь в окисленні органічної речовини компосту. Додатковий прогрів субстрату із застосуванням зовнішніх джерел тепла на початковій стадії компостування прискорює розвиток мікрофлори компосту і може використовуватися для доведення компосту до кондиційної вологості та його стерилізації.

Передпідготовка субстрату, наприклад, запарюванням, механодеструкцією, хімічним або ферментативним гідролізом доцільна, якщо субстрат, такий як кора, лігноматеріали важко піддається компостування.

Дуже часто для прискорення компостування суміш додається готовий компост.

Спеціалізовані біологічні добавки можуть містити ферменти (наприклад, з канижної біомаси шлунка жуйних тварин, комерційні препарати целюлолітичних, гемоцелюлолітичних, пектинолітичних ферментів, мультиензимні композиції), мікроорганізми, виділені з компосту або спеціально селекціоновані штами лігніну, білків та інших біополімерів (стартові культури

на основі термофільних актиноміцетів, бактерій, що мешкають у рубці жуйних, іммобілізованих бактерій *Bacillus subtilis*, *B. licheniformis*, грибів *Pleurotus florida*, *P. ostreatus*, *Trichoderma viride* і т.д. Добавки на основі аборигенної компостної мікрофлори отримують методом накопичувальної культури на компостованих субстратах, наприклад, в апаратах з примусовим перемішуванням та аерацією. Отриману «закваску» вносять до основної компостної маси. Такий метод може використовуватися для прискорення компостування та знешкодження матеріалів, забруднених ксенобіотиками (пестицидами, нафтопродуктами тощо). Скорочення тривалості компостування можливе і при зрошенні компосту водним екстрактом готового компосту. Рекомендовані співвідношення компосту та води при отриманні екстракту 1 : 100. У буртах компост з додаванням екстракту дозріває на 10–20 діб раніше. Додавання стартових культур дозволяє скоротити терміни компостування до 4–15 діб.

Механізованим компостуванням на спеціалізованих установках в біоконвекторах, біореакторах, ферментаційних барабанах, силосах, біотунелях, траншеях і т. п. досягається найбільш висока продуктивність обробки, при цьому тривалість компостування можна зменшити до 2–3 тижнів і навіть до 7 діб. Обсяги біореакторів для компостування досягають 100–500 м³, продуктивність – від 0,5 до 300 т компосту на добу.

У комплекти обладнання таких систем входять: контейнеровози, завантажувачі, транспортери, преси, барабанні гуркити, магнітні сепаратори, установки для подрібнення відходів, змішувачі, біофільтри або компостні фільтри для очищення газів, пристрої для розпушування та перемішування компостної маси грейферного, лопатевого, шнекового та інших типів (рис. 2.15). Компостування з використанням механізованих технологій проводиться у два етапи: перший – прискорене розкладання органічного матеріалу в умовах контрольованих температури, вологості, аерації; другий – дозрівання отриманої компостної маси протягом 3–4 тижнів у буртах або штабелях на майданчиках або в реакторах, де вона стабілізується, знезаражується і висушується.

У вертикальних реакторах типу силосних веж з одноступінчастим і багатоступінчастим (багатоповерховим) циклом (рис. 2.16) компостування проводиться з перемішуванням матеріалу всередині реактора або без перемішування при тривалості від 3 до 21 діб в залежності від типу реактора і технологічного процесу. При цьому зазвичай для прискорення процесу до матеріалу, що компостується, додають частину (до 1/3) готового компосту.

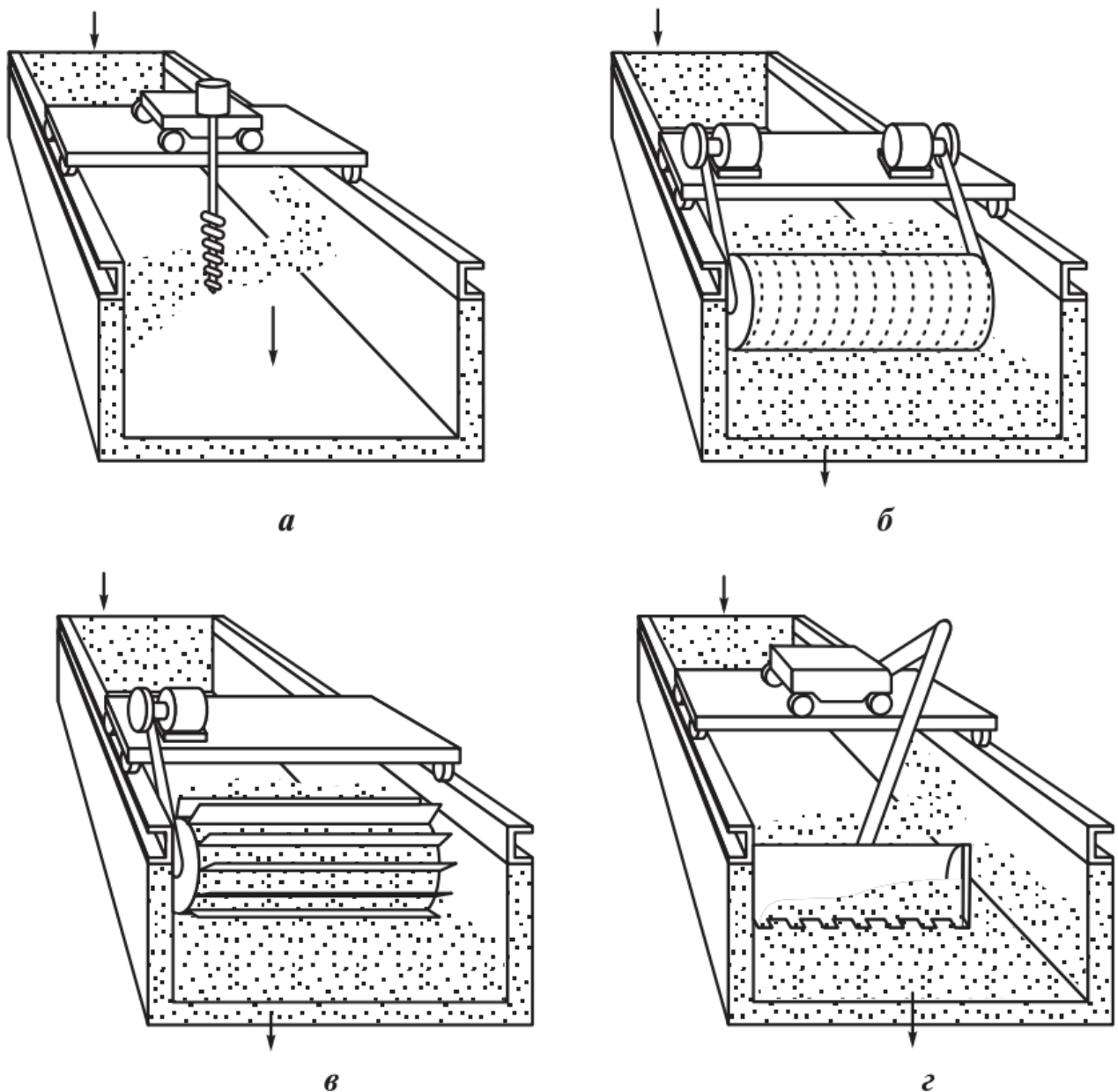


Рис. 2.15. Варіанти перемішувальних пристроїв з валом, що переміщуються, використовуються при компостуванні в механізованих траншейних системах: а – шнековим; б – барабанним; в – коритного типу; г – ковшового типу

Маса, що компостується, завантажується зверху і вивантажується знизу. Повітря для аерації компримується в нижню частину реакторів і відкачується з верхньої частини.

У подовому реакторі (рис. 2.16, в) робочий простір розподілено на поверхи з висотою шару суміші, що переробляється, на кожному поверсі до 0,4–0,8 м, що перешкоджає надмірному злежуванню компостованої маси. Повітря подається на кожен поверх вежі. Перемішування компостованої суміші здійснюється за рахунок обертання подів зі скиданням маси з верхнього поду на розташований нижче. Час компостування на кожному поверсі становить

одну добу. При проходженні через поверхи реактора компостна маса підсушується завдяки хорошій аерації, що дозволяє компостувати суміш з початковою вологістю до 70 %.

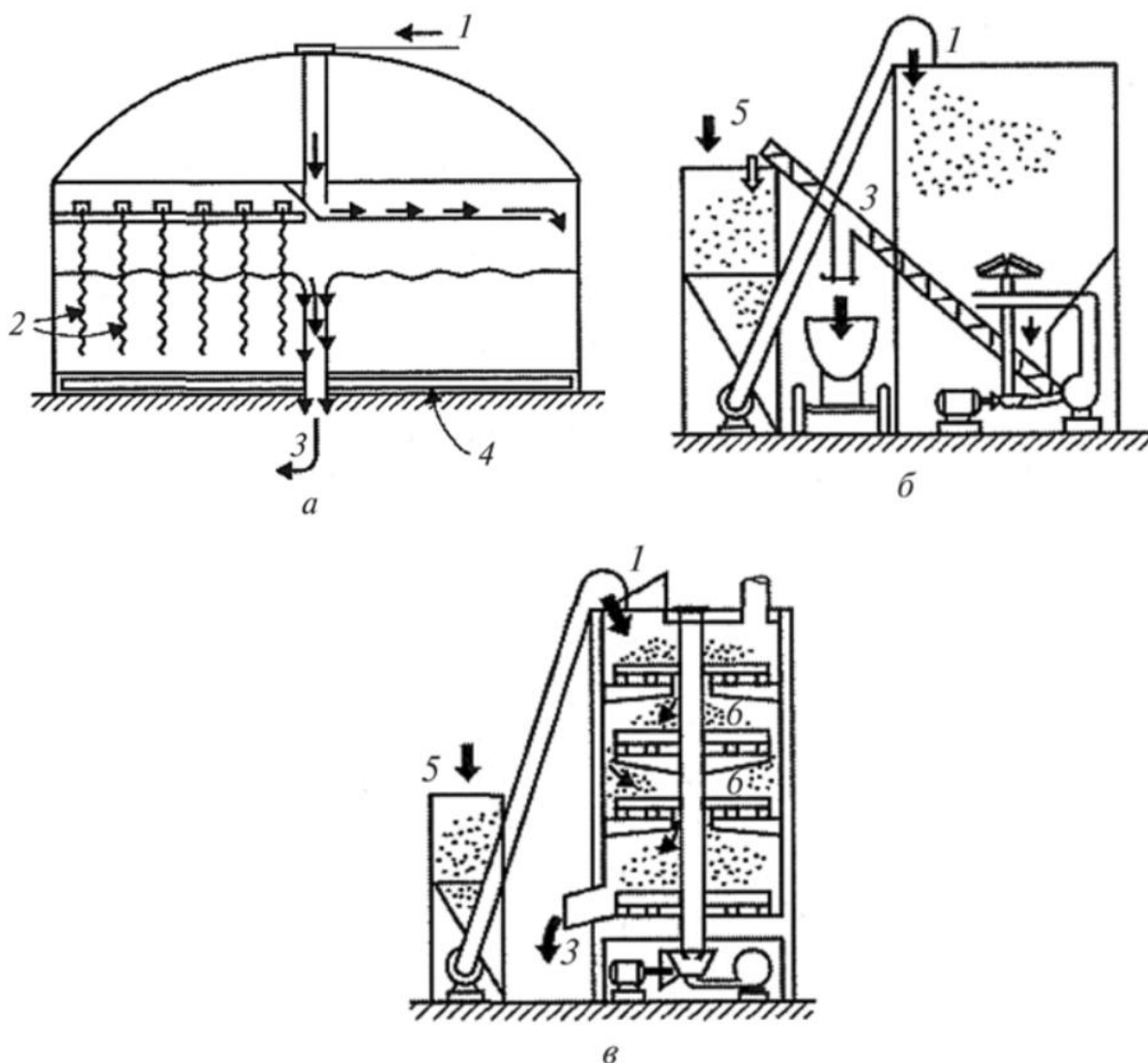


Рис. 2.16. Пристрій вертикальних біореакторів для компостування: а – з перемішуванням всередині реактора; б – з одноступеневим циклом; в – із багаступінчастим багатоповерховим циклом; 1 – подача компостної суміші; 2 – змішувальні пристрої; 3 – вивантаження компосту; 4 – система аерації повітрям; 5 – змішувач; 6 – поди

Недолік промислових механізованих технологій компостування – висока вартість споруд, що в 5–10 разів перевищує вартість споруд для компостування осаду в штабелях, і складність експлуатації.

У механізованих системах компостування можна проводити протягом всього року, але оскільки найбільшим попитом компост користується навесні і

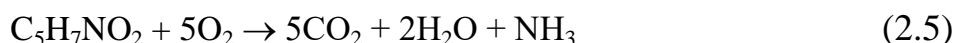
восени, необхідні майданчики і ємності для його зберігання.

Для перероблення органічних відходів у приватних будинках існують малогабаритні установки. Сміття та нечистоти в них у міру аеробного розкладання проходять через камери і через 2–4 роки надходять до останньої камери у вигляді готового гумусу, придатного для добрива садів та газонів.

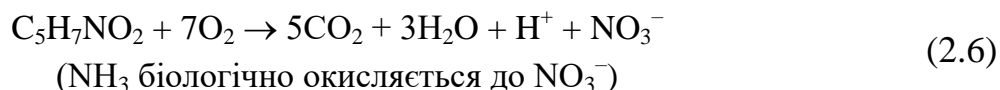
2.4. Аеробна стабілізація

Варіантом аеробної окисної деструкції, яка використовується стосовно активного мулу та осадів споруд біологічного очищення, є *аеробна стабілізація*. За допомогою неї зменшуються маса твердої фази опадів, вміст у них патогенної мікрофлори, покращуються технологічні властивості опадів та придатність для складування та зберігання.

В ході аеробної стабілізації органічна речовина опадів окислюється мікроорганізмами, для яких вона є поживним субстратом. Також відбувається біологічне окислення запасів поживних речовин мікроорганізмів у присутності розчиненого кисню. Органічні речовини самоокислюються або споживаються при ендогенному диханні мікроорганізмів на завершальній стадії їх життєдіяльності, при цьому розпадається до 50 % органічної частини опадів, в основному в результаті мінералізації ліпідів і білків:



або



Чисельність живих бактерій наприкінці мінералізації різко знижується. Зменшення чисельності бактерій відбувається в результаті їх лізису та споживання найпростішими.

Аеробну стабілізацію активного мулу зазвичай *проводять* у безперервному режимі в аеротенках, в циркуляційних окислювальних каналах, окситенках або в спеціальних резервуарах горизонтального або вертикального типу, прямокутної або круглої в плані форми, обладнаних механічними аераторами, при тривалій сут в залежності від виду і ступеня ущільнення осаду, температури стабілізації) і без подачі стічних вод.

Аеробної стабілізації може бути підданий як неущільнений активний мул (концентрація мулу 15–25 г/л), так і ущільнений після відстоювання

(концентрація мулу 30–45 г/л). Вміст розчиненого кисню в аеробному стабілізаторі підтримується вище 1,0 мг/л при середній витраті повітря 1–2 м³/(м³ год). Ущільнений мул і осад первинних відстійників аеруються довше, ніж активний неущільнений мул з вторинних відстійників. Чим більший вік мулу, тим коротший період стабілізації, і навпаки. При зниженні температури з 20 до 8 °С тривалість стабілізації збільшується у 2–2,5 рази.

Стабілізація можлива у мезофільному режимі за 10–42 °С, та у термофільному за 42–70 °С. В останньому випадку стабілізацію проводять у реакторі закритого типу з теплоізоляцією. Тепло, що виділяється в результаті біологічного окислення, може бути використане для розігріву мулу, що стабілізується. Ілова вода з ущільнювачів прямує в аеротенки.

Аеробно стабілізований мул не загниває, не має неприємного паху, добре фільтрується і висушується на мулових майданчиках. У порівнянні з нестабілізованим мулом чисельність патогенної мікрофлори в ньому різко падає (залежно від тривалості аерації та режиму роботи стабілізаторів зниження вмісту бактерій *E. coli* становить 70–99 %), спостерігається інактивація вірусів, при цьому при термофільній стабілізації ступінь знезараження вище. Однак яйця гельмінтів не гинуть, тому використання стабілізованих опадів як добрива або для інших цілей можливе лише після їхньої дегельмінтизації термічними або хімічними методами. Інші недоліки аеробної стабілізації – підвищені витрати на аерацію та мала швидкість процесу, зниження ефективності процесу в зимовий час, тому потрібні великі обсяги аераційних споруд.

При обробці опадів із очисних споруд із великою витратою води цей метод не застосовується.

Для підвищення фільтраційних характеристик і ступеня знешкодження мулу, а також зменшення його обсягу запропоновано використовувати *попередній кислотний гідроліз мулу* з подальшим вирощуванням вторинної мікрофлори. Фільтруюча здатність отриманого мулу в 200 разів більша, ніж нативного. Недолік такого методу – висока енергоємність та необхідність використання кислот для гідролізу.

2.5. Анаеробне зброджування та метаногенерація

Анаеробне зброджування та метаногенерацію застосовують для переробки, знешкодження та зменшення обсягів біомаси різного походження, відходів тваринницьких та птахоферм, опадів очисних споруд, побутових відходів, целюлозо-, білок-, жировмісних та інших матеріалів з великою

часткою органічних речовин. Органічна речовина мінералізується у процесі метаногенерації з утворенням *біогазу*. Біогаз може бути утилізований на енергетичні та теплові потреби.

При переробці 1 кг ТПВ утворюється до 20 л біогазу на добу, а ТПВ міста з населенням 150 000 осіб – до 2 млн м³ біогазу на рік.

При метаногенній переробці гною використовується поняття «*тваринної одиниці*», щоб мати можливість порівнювати кількість біогазу, що виробляється з гною різних тварин. Одній тваринній одиниці умовно відповідають: 1 доросла корова, або 5 телят, або 6 свиней або 250 курок. Одна тваринна одиниця здатна виробляти на добу до 2,5 м³ біогазу. З 1 т сухої речовини гною за оптимальних умов можна отримати 350 м³ біогазу або, в перерахунку на 1 голову великої рогатої худоби, 2,5 м³ на добу, а протягом року – близько 900 м³ біогазу, що еквівалентно теплотворної здатності 600–700 л бензину. При переробці відходів господарств з 550 000 голів великої рогатої худоби можна отримати за добу 2 480 000 м³ біогазу, а з 400 000 голів свиней – 900 000 м³ біогазу.

Частина речовини, що не піддається біологічному руйнуванню (незброджений твердий осад), може бути надалі похована або утилізована. Осад, що утворюється, наприклад, під час зброджування гною або активного мулу, містить велику кількість азоту і фосфору, не містить умовно-патогенної мікрофлори і життєздатного насіння бур'янів (за умови термофільного зброджування), він придатний для аеробного компостування або безпосереднього використання як добрива в сільському господарстві, а деяких випадках – як джерело кормового вітаміну *B*₁₂. Останнім часом анаеробне зброджування застосовують і для розкладання токсичних ксенобіотиків у забрудненому ними матеріалі.

У таких країнах як Китай, Індія, Корея, Тайвань, Таїланд, США, Канада, Японія, Данія анаеробне зброджування відходів у біогаз широко використовується. Біогазові реактори, великі та середні біогазові електростанції переробляють органічні відходи міст, відходи тваринництва та птахівництва, винних заводів із отриманням електроенергії. Біогазова продукція в Китаї оцінюється в $33 \cdot 10^{15}$ Дж. У Данії в експлуатації знаходиться кілька десятків централізованих біогазових заводів, здатних щорічно обробляти більше 1,5 млн т біомаси (75 % відходів тваринництва і 25 % інших органічних відходів) понад 50 млн м біогазу.

В Україні з різних варіантів метаногенної переробки відходів найбільш поширене *анаеробне зброджування опадів стічних вод* у метантенках: активного мулу вторинних відстійників або відстійників-ілоуцільнювачів без

зневоднення та з попереднім зневодненням на центрифугах, вакуум-фільтрах, фільтр-пресах; осадка первинних відстійників, з ґрат після подрібнення; біоплівки з біофільтрів. Типова схема установки для переробки активного мулу наведена на рис. 2.17. Вихід біогазу в залежності від складу суміші осаду, що зброджується, становить $5\text{--}22 \text{ м}^3/\text{м}^3$ суміші при вологості осаду $94\text{--}97,5 \%$ або $0,4\text{--}0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ беззольної речовини опадів.

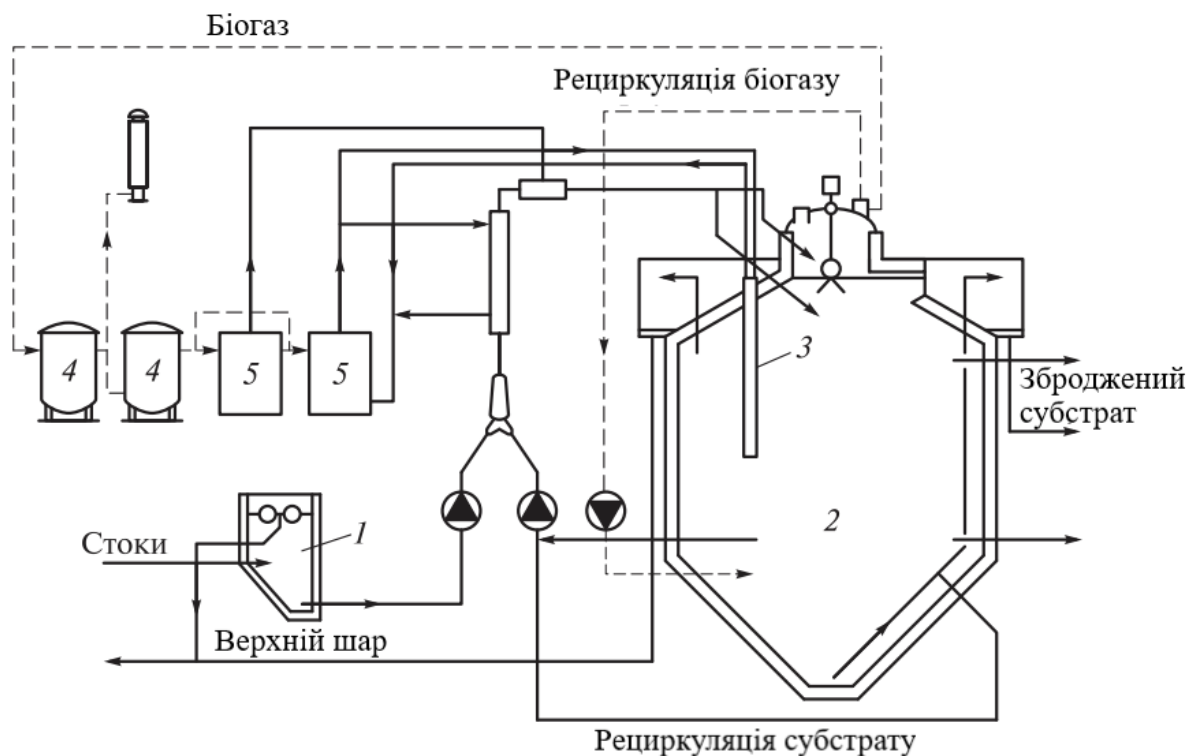


Рис. 2.17. Схема установки метаногенного зброджування активного мулу, що одержується з очисних споруд міських стоків: 1 – відстійник; 2 – метантенк; 3 – теплообмінник; 4 – пристрої для очищення біогазу; 5 – парогенератори

Як і при анаеробному очищенні стічних вод, зброджування твердих відходів може проводитися як при знижених, так і при підвищених температурах, але найбільш поширеним є мезофільне зброджування.

Переробка в метантенках опадів стічних вод і гною в мезофільному режимі триває близько 30 діб, в термофільному – близько 5–10 діб при навантаженні по сировині, що зброджується, від $0,5 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$ до $5\text{--}6 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$. Зброджування соломи з вологістю близько 60 % за температури $35 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається на 90 % за 120–200 діб, за $55 \text{ }^\circ\text{C}$ – за період 60–90 діб. Лігногумінова складова рослинної біомаси зброджується, але утворює набагато менше біогазу.

Для очищення $55 \text{ м}^3/\text{добу}$ гнійних стоків, що надходять зі свиноферми на

1000 голів свиней, із вмістом 5–6 % твердих частинок потрібно біореактор об'ємом 570 м³ при навантаженні 3,5 кг/(м³·добу) та часу перебування 10 діб. Вміст метану в біогазі 69 %. Концентрація органічної речовини в сировині, що надходить до реактору, має становити не менше 2 %. При менших концентраціях вміст бактеріальних клітин різко падає і процес практично зупиняється.

Ферма на 1000 голів великої рогатої худоби при нормальному годуванні та додаванні до підстилки не менше 4 кг соломи на добу/голову виробляє 30–50 т відходів вологістю близько 85 %. Для переробки цієї кількості відходів методом твердофазної ферментації необхідний реактор загальним об'ємом 1200 м³, або методом рідкофазної ферментації – 2400 м³. На добу утворюється ~2000 м³ пального газу, з яких ~600 м³ споживається на потреби установки і ~1400 м³ може використовуватися для задоволення потреби в енергії 1000 домогосподарств по 4 особи в кожному.

Ефективність анаеробної переробки відходів може бути підвищена попереднім концентруванням рідких відходів (наприклад, активного мулу) перед зброджуванням, добавками різних компонентів у вихідний субстрат (наприклад, соломи до курячого посліду), подрібненням сировини, передобробкою відходів різними методами (переаерацією, гідролізом під тиском, кислотним, лужним, ферментативним гідролізом, делігніфікацією та ін), використанням методів двостадійного зброджування і більш досконалих конструкцій анаеробних реакторів.

У відходах важливо контролювати концентрацію іонів важких металів, інших токсичних речовин, що інгібують зброджування. Крім того, токсичні домішки сорбуються зброженим осадом, що ускладнює його утилізацію.

У методі *двостадійної анаеробної переробки в окремих реакторах* першої стадії здійснюється кислотне бродіння (гідроліз, ацидогенез, ацетогенез), а в другий – метаноутворення. Такий розподіл забезпечує оптимальні умови для перетікання кожної зі стадій і підвищення сумарної швидкості процесу.

2.6. Біоконверсія в теплову енергію та паливо

Біоконверсія в теплову енергію та паливо – один із шляхів поповнення енергетичних ресурсів на основі відновлюваної рослинної сировини та органічних відходів.

Запаси енергії, що пов'язуються біомасою рослин щорічно, можна порівняти з сумарними запасами енергії нафти, природного газу, вугілля та

урану. Пряме спалювання біомаси дозволяє безпосередньо виробляти тепло та енергію для різних цілей. У більшості країн світу цим способом виробляється до 10 % енергії, а в деяких – до 25–30 %. Однак таке енергетичне джерело має ряд істотних *недоліків*: низьку теплотворну здатність через високий вміст у своєму складі кисню та вологи (тепла згоряння целюлози в 2 рази нижче, ніж етанолу, і в 3,5 рази нижче, ніж метану), складності зі збиранням та вивезенням у місця переробки, часто сезонний характер продукції, залежність від кліматичних факторів, забруднення повітря димом печей. Інтенсивна вирубка лісу при відносно повільному природному відновленні запасів біомаси або спеціальній культивуванні монокультур з метою подальшого спалювання порушує цінози, що склалися, і ускладнює збільшення частки біомаси в сумарно вироблюваній енергії.

Проте роль біомаси як відновлюваного палива зростає у зв'язку з розробками нових більш ефективних технологій спалювання та конверсії, вирішенням проблеми підтримки глобального балансу CO₂ в атмосфері. При спалюванні біомаси виділяється стільки ж CO₂, скільки споживається під час фотосинтезу.

Як *джерела біомаси* для вироблення палива в ряді країн, особливо в країнах тропічного поясу, вирощують, зокрема, високоурожайні сорти деревних рослин (евкаліпт, вербу, тополю та ін.), цукровий тростинник, кукурудзу, ріпак, водяний гіацинт. Наприклад, з 1 га плантації евкаліпта, що використовується для отримання біоетанолу, можна отримати до 10–30 т біомаси на рік.

Водяний гіацинт (*Eichhornia crassipes*) (рис. 2.18), широко поширений у пресних водах тропічних і субтропічних країн, культивують для отримання біогазу.



Рис. 2.18. Водяний гіацинт

Робляться серйозні зусилля для підвищення врожайності «паливних»

рослин, відбору або виведення нових різновидів рослин з високою врожайністю на посушливих, болотистих, засолених або надмірно обводнених землях, вдосконалення способів переробки отриманої біомаси, утилізації складних деревини.

Не менш важливе та екологічно більш раціональне джерело енергії та палива – *відходи* міського та сільського господарства, промисловості: гній, активний мул, побутове сміття, багаса (відхід цукрової тростини, після подрібнення та відокремлення від неї соку), меляса, побічні продукти виробництва паперу та целюлози, солома, лушпиння тощо.

Енергетична ефективність та цінність біомаси як джерела палива може бути підвищена методами біологічної, термічної та термохімічної конверсії (рис. 2.19).

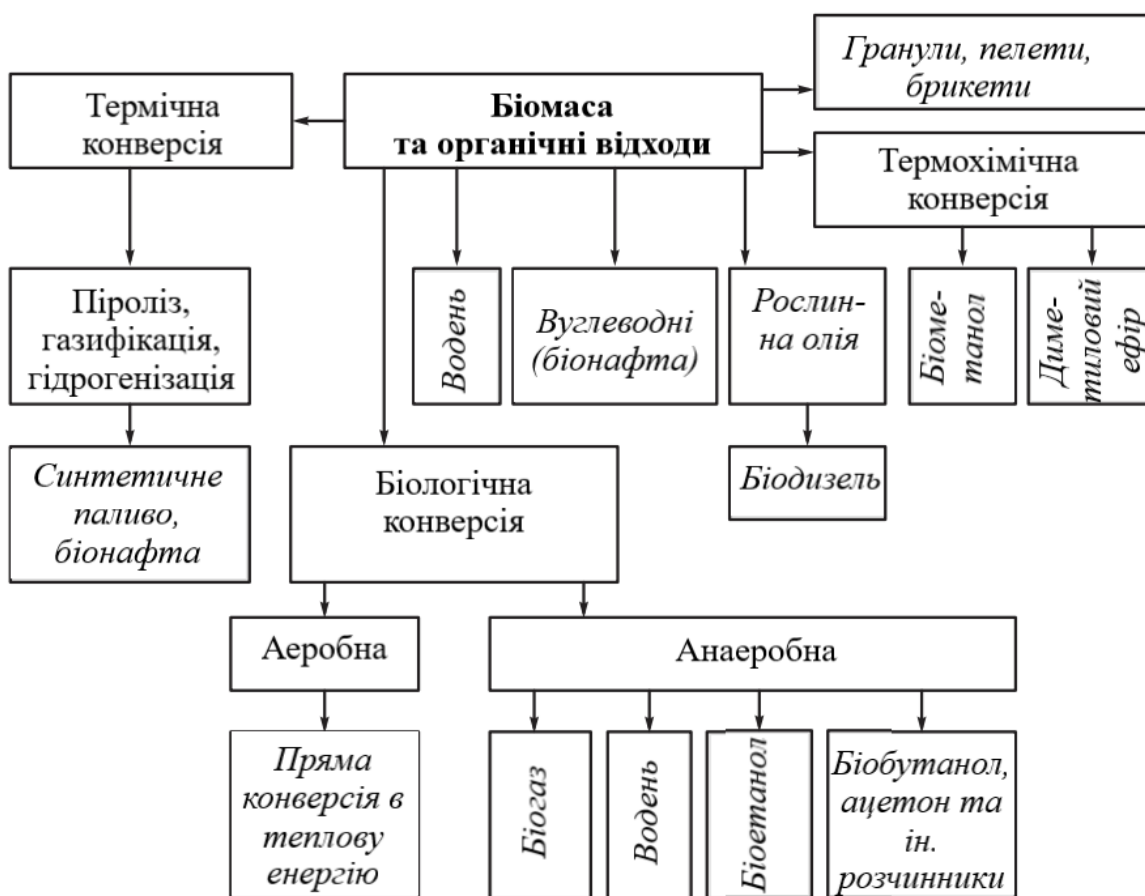


Рис. 2.19. Варіанти конверсії біомаси в теплову енергію та паливо

Один з варіантів *підвищення якості біомаси як палива* – переробка її в гранули, пелети, брикети, які можна отримувати як з деревини, так і з різних органічних відходів шляхом обробки парою під тиском. За теплотворною здатністю такі гранули займають проміжне положення між бурим і кам'яним вугіллям, зручні в транспортуванні, використанні. При їх спалюванні, на

відміну від вугілля, залишається набагато менше золи, і викиди оксидів сірки є незначними.

Деякі компоненти палива можна безпосередньо виділяти з рослин і одноклітинних організмів, що накопичують їх у великих кількостях. Наприклад, існують рослини, що синтезують і накопичують у своїй масі 10 % і більше вуглеводнів (каучуконоси, латексутворюючі рослини сімейства молочайних). Латекс являє собою 30 % емульсію олії і терпенових вуглеводнів з молекулярною масою 10-20 тис., у той час як у каучуку вона становить 1-2 млн. З олії шляхом каталітичного крекінгу можна отримати вуглеводні. Робляться великі зусилля з селекції сортів, що синтезують вуглеводні з низькою молекулярною масою. Особливо перспективними є представники роду *Euphorbia*, що накопичують до 30 % (за масою) латексу, що містить вуглеводні відносно невеликої молекулярної маси.

Мікродорослі *Botryococcus*, *Isochrysis*, *Nanochloropsis* накопичують до 80 % (від сухої маси клітин) вуглеводнів з довжиною ланцюга C₁₇-C₃₄. Ці водорослі можуть бути вирощені в біореакторі у вигляді чистої культури. Їх можна також культивувати у складі природних екосистем в озерах, ставках чи лагунах.

У тропічних та помірних широтах сонячна радіація, що досягає Землі, становить близько 700 Вт/м². Під час проходження через атмосферу та хмари частина енергії втрачається, тому безпосередньо на поверхні Землі її інтенсивність становить близько 150–200 Вт/м², з яких фотосинтезуючі організми засвоюють 0,2–1,0 %, тобто 0,3– 2,0 Вт/м² або 5–32 МДж/(м²·рік) (при 12-годинному світловому дні). У перерахунку на кількість запасених вуглеводнів, що містять цю енергію у вигляді теплоти згоряння, ця величина еквівалентна 100-650 г вуглеводнів на 1 м² (1,0–6,5 т/(га·рік)) при теплотворній здатності вуглеводнів – 49 кДж/г.

Низький ККД фотосинтезу в більшості випадків обумовлений тим, що фотосинтез лімітується не світловим потоком, а іншими факторами: концентрацією CO₂, мінеральних солей, вологістю, температурою, тому продуктивність водоростевих ставків можна істотно підвищити внесенням мінеральних добрив, подачею CO₂, раціональною організацією агротехніки вирощування. При вирощуванні одноклітинних водоростей *Botryococcus braunii* у біоставках досягнуто продуктивності 0,09 г вуглеводнів на 1 л на добу або 60 т/га на рік. У лабораторних умовах можна підвищити ККД фотосинтезу до 15–18 %, а польових до 10–15 %. У лабораторних і промислових біореакторах можна створити оптимальні умови для зростання мікродоростей, забезпечити

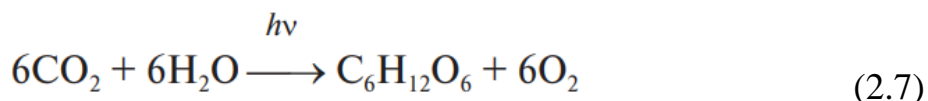
інтенсивне зростання генетично модифікованих продуцентів, таким чином підвищити ефективність фотобіосинтезу і відповідно продуктивність синтезу вуглеводнів.

З біомаси водоростей вуглеводні виділяють екстракцією органічними розчинниками з подальшою відгонкою розчинників і вуглеводнів або центрифугуванням. У *V. braunii* вуглеводні накопичуються в клітинній стінці, після центрифугування клітини не руйнуються та їх повторно використовують. Для поліпшення паливних характеристик отримані з водоростей вуглеводні піддають гідруванню. В результаті одержують речовину, відому як «біонафту» та аналогічну за своїми якість дизельному паливу або гасу. Біонафтою називають і продукти, які отримують з деревної маси термічною та термохімічною конверсією: піролізом, газифікацією, гідрогенізацією.

Інші біотехнологічні підходи до підвищення ефективності перетворення сонячної енергії – конверсія фотосинтезованої біомаси у водень; модифікація самого процесу фотосинтезу з прямим утворенням водню або іншого палива, минаючи стадії фотоасиміляції CO₂ та синтезу компонентів клітини; безпосереднє перетворення енергії Сонця в електричну за допомогою біофотоелектричних перетворювачів енергії.

Водень як паливо відноситься до найбільш енергоємних та екологічно чистих сполук. Один з варіантів його отримання – на основі мікроскопічних водоростей і анаеробних бактерій (зокрема, р. *Clostridium*) з отриманням кисню і водню.

Водорості:



Бактерії:



Максимальний ККД утворення H₂ при бродінні становить 33 %, що вище за ККД електролізу води (20 %), але нижче при конверсії в CH₄ (ККД до 85 %).

Можливе одержання водню прямою мікробіологічною або ферментативною конверсією органічних речовин, що містяться, наприклад, у рідких стоках (таких як молочна сироватка). Так, деякі фототрофні бактерії виділяють водень у присутності донорів електронів – органічних сполук, сірководню та ін. Наприклад, швидкість утворення H₂ пурпуровими фототрофними бактеріями *Rhodobacter capsulatus* досягає 300 мл/(год·г сухих речовин). Використовуючи лактат як донор електронів, з 1 кг лактату можна

отримати до 1350 л Н₂. При утворенні пурпуровими бактеріями Н₂ ККД конверсії енергії світла сягає 2,0–2,8 %.

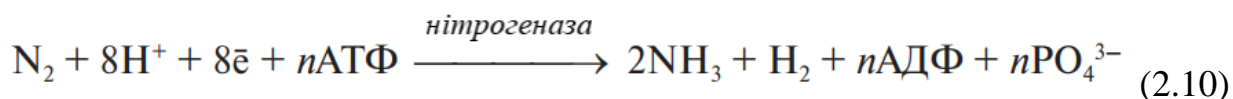
Ціанобактерії можуть виділяти водень, використовуючи лише енергію світла та воду як донор електронів. Деякі з них можуть виділяти Н₂ і в аеробних умовах. За розрахунками, у ціанобактерій ККД перетворення світла у водень може становити 10 %, тому вони також розглядаються як потенційні продуценти Н₂.

Біопаливна система з хлоропластів шпинату і бактеріальних екстрактів, що містять гідрогеназу, може при опроміненні видимим світлом виділяти Н₂ з більшою ефективністю, якщо переносником електронів виступає ферредоксин.



Недолік цього варіанту отримання водню – нестабільність ізольованої гідрогенази і швидке інгібування її активності воднем і киснем. Частково ця проблема може бути вирішена іммобілізацією ферменту, що запобігає пригніченню киснем. Очікується, що така стабільна система для отримання Н₂ шляхом фотолізу води, витрачаючи 106 Дж/м² сонячної енергії на добу при інтенсивності освітлення 100 Вт/м², зможе виробляти на день 90 л Н₂ на 1 м² (близько 3 кг Н₂/(м²·рік)) з енерговмістом ~400 МДж).

Фототрофні азотфіксуючі бактерії *Rhodospseudomonas sp.* виділяють водень за участю ферменту нітрогенази:



У відсутність N₂ нітрогеназу відновлює Н⁺ до Н₂ (залежний процес). Штами цих мікроорганізмів з нітрогеназою, що не утилізує N₂, можуть бути ефективними продуцентами водню.

Розглядається також можливість використання галобактерій та синтезованого ними білка бактеріородопсину для створення ефективних фотоелектричних біопаливних систем.

Для отримання енергії та палива органічні відходи, як і біомаса, що спеціально вирощується, можуть бути перероблені аеробними та анаеробними методами біоконверсії.

Пряма конверсія в теплову енергію – аеробний процес. До процесів біоконверсії в паливо відносять отримання етанолу, біогазу, а також таких органічних розчинників, як бутанол, ацетон та ін. Ці процеси – анаеробні.

Пряма біоконверсія в теплову енергію аналогічна до компостування. Початковий матеріал завантажують у шахту, знизу подають повітря (рис. 2.20).

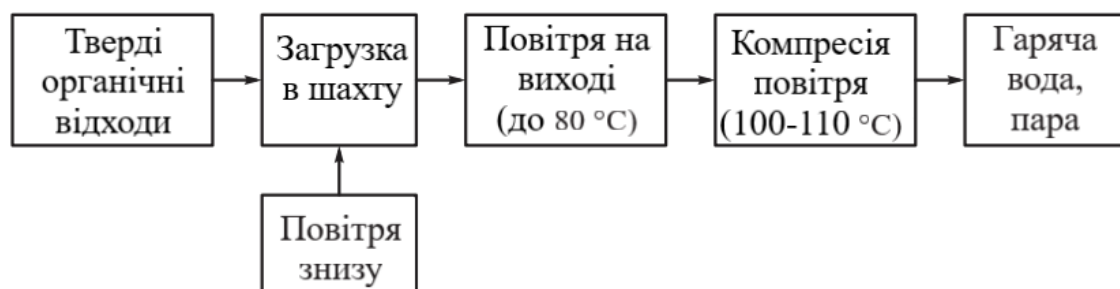


Рис. 2.20. Біоконверсія органічних речовин у теплову енергію

В результаті мікробіологічного окислення, що інтенсивно розвивається, компостна маса розігрівається і повітря, що виходить, нагрівається до 70–80 °С. Повітря компримують, нагрівають їм воду та отримують пару. ККД установок прямої конверсії в теплову енергію досягає 95 %. Після конверсії залишається шлам, який можна використовувати як органо-мінеральне добрива.

У зв'язку зі зростанням вартості нафти і проблемами забруднення навколишнього середовища зростають масштаби виробництва рідкого біопалива. З рідких продуктів біологічного синтезу, що використовуються як паливо, найбільше практичне застосування отримали метилові ефіри жирних кислот рослинної олії (біодизель), а також біоетанол і біобутанол.

Рослинну олію, що одержується з олійних рослин: ріпаку, сої, соняшнику, можна використовувати в чистому вигляді для застосування в дизельних двигунах після їх невеликої модернізації (потрібна додаткова апаратура для впорскування олії). Омиляючи масло метанолом або етанолом з наступним відділенням метилових або етилових ефірів жирних кислот, що утворюються, від гліцерину (побічний продукт), отримують більш ефективне за експлуатаційними характеристиками і довговічністю роботи двигуна моторне паливо – біодизель.

В даний час для отримання біодизелю в основному використовується хімічний процес омилення олії (рис. 2.21).

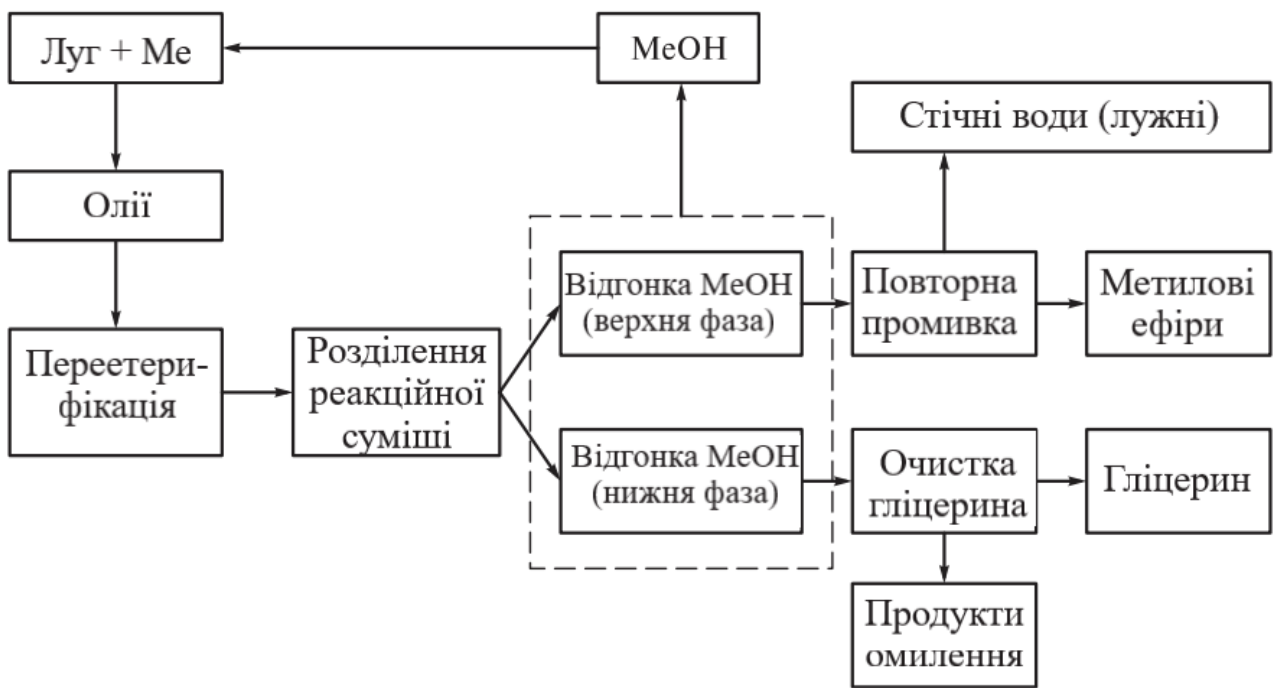


Рис. 2.21. Схема лужного способу одержання біодизельного палива з омиленням метанолом

Процес здійснюють у присутності луку за температури 60–70 °С. Отримані ефіри жирних кислот і гліцерин розподіляють і відмивають від залишків луку. При хімічному процесі утворюється велика кількість лужних стічних вод з високим ХСК (до 80 000 мг/л), які необхідно знешкоджувати.

Розроблений ферментативний процес омилення рослинних олій з використанням ферменту ліпази, схема якого представлена на рис. 2.22.

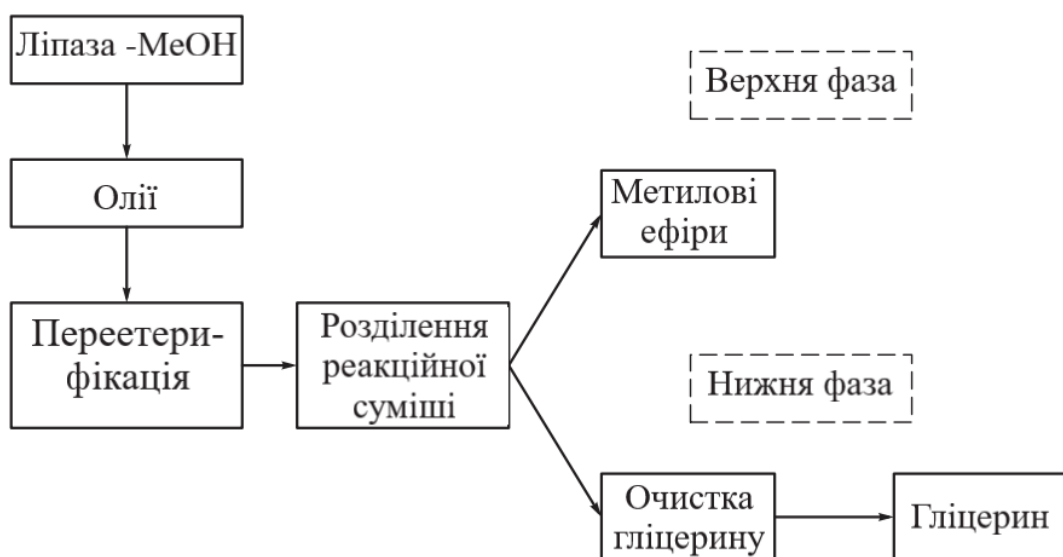


Рис. 2.22. Схема ферментативного способу одержання біодизельного палива

При ферментативному омиленні енергії споживається менше, легше отримати очищені продукти (ефіри жирних кислот і гліцерин), але витрати на отримання біодизеля вищі через високу вартість ферменту. Тому основними шляхами вдосконалення даної технології є здешевлення та оптимізація умов проведення ферментативного каталізу, зокрема, підвищення стабільності ліпаз, їх стійкості до метанолу та швидкості ферментативної переестерифікації.

Біодизель використовують у чистому вигляді або в суміші з паливом (до 30 % біодизеля та 70 % звичайного дизельного палива). На естерифікованій олії можуть працювати звичайні дизельні двигуни без переоснащення.

У Європі для виробництва біодизеля застосовуються в основному технічні сорти ріпаку з високим (понад 25–30 %) вмістом мононенасиченої ерукової кислоти ($C_{22:1}$), що підвищує стійкість палива до окислення. Такі сорти ріпаку непридатні для одержання олії харчового призначення (у харчовій олії вміст ерукової кислоти не має перевищувати кількох десятків відсотків). Крім ріпаку для виробництва біодизеля можна використовувати суріпку, соняшник, кукурудзу та інші олійні культури, проте агротехнологія обробітку ріпаку є більш простою. З рослинних олій рапсова є найдешевшою.

У Німеччині під ріпак виділяється приблизно 10 % сільськогосподарських земель. При врожаї насіння ріпаку до 30 ц/га виробляють до 1300 л/га біодизельного палива. Відходи рослин, що залишаються після віджиму олії, можуть бути перероблені на білковий корм.

Біодизель має високе цетанове число (характеризує займистість дизельних палив. Чим вище цетанове число, тим більше спокійно і плавно горить паливна суміш; оптимальну роботу стандартних двигунів забезпечують дизельні палива з цетановим числом 40–55; при більшому цетановому числі характеристики палива погіршуються.), задовільну займистість, мастильні показники, проте дещо поступає дизельному паливу за іншими експлуатаційними характеристиками (витрата палива, потужність двигуна, корозійна активність, хімічна стабільність і можливість утворення та відкладення продуктів полімеризації та суспензій в системі подачі палива автомобіля, необхідність додавання депресантів в умовах температур нижче -15°C для зниження температури застигання палива). Серед усіх видів біопалива біодизель має найнижчу вартість, яку можна порівняти з вартістю звичайного дизельного палива (в межах 1 євро). Екологічними перевагами біодизеля є нешкідливість для природної біоти, біорозкладність, низький вміст сірки, менші викиди сажі, вуглеводнів, що не згоріли, оксидів азоту,

монооксиду і діоксиду вуглецю. У той же час використання рослинної олії в паливних цілях конкурує з її споживанням на харчові та технологічні цілі і залежить від врожайності олійних культур.

Для виробництва біопалива можна використовувати ліпіди, що синтезуються і накопичуються мікроорганізмами. Однак одержання такого «мікробного біодизеля» в 3–6 разів більш витратне, ніж одержання з олійних рослин.

В Україні біодизельне паливо у великих масштабах поки не виробляється і не використовується. Паливний етанол (*біоетанол*) виробляють у найбільшій кількості в порівнянні з іншими видами рідкого біопалива. Біоетанол як пальне для двигунів внутрішнього згоряння використовують у чистому вигляді або в суміші з бензином (використовується зневоднений, абсолютований етанол, щоб уникнути проблем з водяним конденсатом та розшаруванням суміші). Суміш 10–20 % етанолу та 80–90 % бензину відома як *газохол*. Добавки спирту в бензин збільшують октанове число палива, забезпечують повніше згоряння його, знижують сумарну кількість шкідливих викидів у довкілля. Недоліки етанолу як палива – менша енергоємність і більша витрата в порівнянні з бензином, висока гігроскопічність, що загрожує розшаруванням палива, корозією та утворенням льоду, підвищений викид альдегідів у навколишнє середовище при згорянні двигуна. Суміші біоетанолу з бензином можна використовувати на автомобілях із бензиновим інжекторним двигуном після невеликої модернізації.

У різних країнах як сировина для виробництва біоетанолу використовуються кукурудза, пшениця, тропічні культури (цукровий очерет, маніок та ін). Сприятливі кліматичні умови сприяють отриманню високих урожаїв, а дефіцит нафти формує попит на біоетанол.

Першою країною, яка розпочала великомасштабне виробництво *етанолу* як автомобільного пального, стала Бразилія. Етанол виробляється з цукрової тростини. Відносно невисока ринкова вартість цукрової тростини, використання тростинного жому як палива на самих підприємствах з отримання етанолу та висока вартість нафти дозволяють конкурувати з біоетанолом з бензином. В даний час істотна частина оброблюваних земель в цій країні зайнята цукровою тростиною, що вирощується з метою отримання спирту.

Біоетанол з кукурудзи у великих кількостях виробляється у США, де періодично утворюються величезні надлишки кукурудзи, та отримання з неї етанолу допомагає вирішити проблему реалізації врожаю та знизити залежність

від імпорту нафти. Для стимулювання використання етанолу як моторного палива введено податкові пільги, які компенсують продавцям збиток у разі, якщо вони продають етанол за ціною бензину. «Енергетичний Білль», прийнятий у США, законодавчо вимагає використання 23 млн т біопалива (в основному біоетанолу та біодизелю) у 2012 р. та 108 млн т біопалива до 2022 р.

У країнах Євросоюзу частка палива з відновлюваних джерел, насамперед, біоетанолу, становить щонайменше 5,75 %.

Міжнародна асоціація повітряного транспорту планує замінити до чверті споживання нафтового палива літаками на біопаливо або синтетичне паливо до 2015 р. та на третину – до 2030 р.

В Україні технічний етанол виробляють із *гідролізатів деревини*. Гідролізати деревини отримують в результаті перколяційного гідролізу рослинної сировини (деревної тирси, тріски, відходів сільського господарства: рисового лушпиння, соняшnikової лушпиння, обмолочених стрижнів качанів кукурудзи) в умовах високої температури (160–200 °С) при тиску 2–4 атм в присутності розведеної сірчаної кислоти. У цих умовах рослинні полімери целюлоза і геміцелюлоза розщеплюються з утворенням моносахарів (гексоз і пентоз), які переходять у гідролізати.

Лігнін – інший полімерний компонент, що входить до складу рослинної маси і імпрегнує целюлозу і геміцелюлозу, не гідролізується і залишається як відхід. Частина з цукрів, що містяться в гідролізатах (гексози), може зброджуватися дріжджами в етанол. Незброжені С₅-цукри та уронові кислоти, що залишаються після відгону спирту, утилізуються з отриманням кормових дріжджів (вихід біомаси дріжджів з 1 т деревини 40 кг).

В Україні було збудовано кілька десятків гідролізних та гідролізно-дріжджових заводів (профіль заводів визначається складом сировини), на яких отримували технічний етанол, кормові дріжджі, рідкий та твердий діоксид вуглецю (сухий лід), фурфурол, ксиліт та деякі інші продукти. Перевагою цього способу є одержання етанолу без використання харчової сировини.

З 1 т деревини хвойних порід можна отримати до 170–180 л етанолу за умови виходу спирту 48 % від цукрів, що зброджуються, які містяться в гідролізатах. З 1 т деревини листяних порід – менше, оскільки вміст цукрів, що зброджуються, в цьому виді сировини нижче.

Гідролізат деревини, що отримується високотемпературним перколяційним гідролізом, – субстрат *недоброякісний*. Він містить багато речовин, що утворюються за високих температур і пригнічують розвиток мікроорганізмів, тому в промислових масштабах його використовують лише

для отримання продуктів бродіння (насамперед етанолу) та кормових дріжджів.

У технологічному процесі не вдається переробляти гідролізати із високим вмістом цукрів. Сусло, що подається на ферментацію, має утримувати не більше 3–4 % цукрів, тому після бродіння воно містить не більше 1,5–2 % етанолу, і витрати на відгін і ректифікацію спирту є великими. При відгоні 10 %-го розчину етанолу витрата пари становить 2,25 кг на 1 л 96 %-го спирту, що отримується, а при відгоні 2 %-го – збільшується вже до 10 кг.

Іншим недоліком гідролізних заводів є висока капіталоємність – для проведення гідролізу рослинної сировини потрібні дорогі гідролізо-перколяційні апарати, системи очищення гідролізатів, підготовки їх для ферментації. Крім того, це виробництво завдає екологічних збитків, оскільки при отриманні гідролізатів як твердий відход утворюється велика кількість гідролізного лігніну, проблема утилізації якого досі не вирішена, витрачаються великі обсяги технологічної води. З цих причин до останнього часу отримання етанолу з гідролізатів деревини залишалося в цілому економічно та екологічно неефективним, низькорентабельним, а іноді й збитковим.

Низький вміст етанолу в зброженій сировині обмежує можливості отримання його з таких відходів, як, наприклад, нативна молочна сироватка. Технології переробки сироватки на етанол існують, але зброжена сироватка містить лише 1,5–2,5 % етанолу, і собівартість спирту-ректифікату є високою. Проте в комплексі з вирішенням екологічних проблем, обумовлених скиданням неутілізованої молочної сироватки у водойми, цей варіант отримання етанолу може знайти практичне застосування.

Інша сировина – *зерно* та *картопля*, меншою мірою *меляса* – також використовуються для виробництва харчового етанолу. З 1 т картоплі можна отримати до 100 л етанолу, а з 1 т ячменю, пшениці чи жита – 260–300 л етанолу. За цих варіантів у зброженому суслі вміст етанолу становить 7–8 % і витрати на відгін є відносно невеликими. Але харчова сировина має досить високу вартість, частка її у собівартості продукції сягає 60–70 %.

Крім того, у зерно-спиртовому та картопле-спиртовому виробництвах утворюється велика кількість барди – рідкого відходу, що залишається після відгону спирту. До останнього часу в Україні етанол, який отримується з гідролізатів деревини, зерна або картоплі, як паливо практично не використовувався. Для масштабного виробництва паливного етанолу з біомаси необхідно вирішити кілька *проблем*:

– забезпечити це виробництво сировиною, що містить потрібну кількість вуглеводів, що зброжуються, яку можна одержати дешевим способом і при

малих енерговитратах;

- підвищити кінцевий рівень накопичення спирту в ферментаційному середовищі з метою зменшення витрат на відгін спирту;

- бажано при цьому не використовувати сировину харчового та кормового призначення;

- виробництво біоетанолу має бути екологічно чистим, щоб ступінь утилізації відходів була високою, надходження забруднень в навколишнє середовище при отриманні біоетанолу не перекивало позитивний екологічний ефект при його використанні як паливо;

- енергетичні витрати на отримання спирту мають бути істотно нижчими за енергію, що міститься в самому спирті (коефіцієнт *EROEI* - *energy returned on energy invested* повинен бути істотно вище за 1).

Для зниження собівартості паливного етанолу розробляється низка варіантів удосконалення біотехнології його одержання.

На вітчизняних підприємствах при отриманні спирту за класичною технологією як штами-продуценти використовуються в основному дріжджі *Schizosaccharomyces pombe* (на гідролізатах деревини), *Saccharomyces cerevisiae* (при використанні в якості сировини зерна або картоплі), іноді *S. Uvarum* (*carlsbergensis*) і *S. diastaticus*. Оптимальна температура для їх зростання та процесу бродіння 25–33 °С, *pH* 4–5; при цьому значенні *pH* зменшується небезпека бактеріальної контамінації, що негативно впливає на спиртове бродіння.

Звичайна продуктивність реактора при бродінні в періодичних умовах 1–2 г етанолу/(год·г сухих речовин). На підприємствах ферментацію проводять за безперервних умов, а продуктивність реактора збільшують шляхом повернення на ферментацію дріжджової біомаси, згущеною за допомогою сепаратора.

Недоліки штамів-сахароміцетів та шизосахароміцетів:

- належать до факультативних анаеробів, у яких спостерігається конкуренція між бродінням і диханням в мікроаерофільних і аеробних умовах, тому необхідно вести процес в анаеробних умовах або використовувати мутанти, що втратили мітохондрії і нездатні до дихання;

- чутливі до етанолу у концентрації 8–10 % та вище. Стійкі мутанти характеризуються зміненою будовою клітинних мембран;

- відсутність ферментів, що каталізують розщеплення крохмалю, целюлози, ксилану, тому потрібно проводити передгідроліз субстрату або використовувати змішану культуру мікроорганізмів;

- не зброджують С₅-цукри і не утилізують уронові кислоти та фенольні

сполуки, які є в гідролізатах.

Підвищити швидкість спиртового бродіння і вихід спирту можна за допомогою бактерій, термофільних мікроорганізмів, мікроорганізмів, здатних одночасно гідролізувати рослинні полімери і зброджувати цукри; мікроорганізмів, стійких до високих концентрацій етанолу, а також тих, що зброджують пентози.

Більш ефективно зброджують цукри та більш стійкі до етанолу бактерії *Zyotomonas mobilis*. Цей вид має більшу швидкість росту і утворення етанолу, ніж дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*, зберігає життєздатність при об'ємній частці етанолу в середовищі 14 %. Питома продуктивність біореактора з цими бактеріями в режимі періодичного культивування становить 2,5–3,8 г етанолу/(год·г сухих речовин). Бактерії *Z. mobilis* розкладають вуглеводи через 2-кето-3-дезоксиглюконоатний шлях. Піруват, як і у дріжджів, є проміжним продуктом, який декарбоксілюється в ацетальдегід, а потім відновлюється в етанол; при цьому з 1 моллю глюкози утворюється 2 моль спирту. У порівнянні з дріжджами кількість синтезованого АТФ у бактерій в два рази менше. Це призводить до того, що бактерії на 1 моль перетвореної глюкози синтезують вдвічі менше біомаси, ніж дріжджі, а вихід етанолу при цьому збільшується приблизно на 5 %. Порівняльна характеристика бродильних властивостей вільних клітин дріжджів *S. Carlsbergensis* і бактерій *Z. mobilis* наведена в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Порівняльна характеристика бродильних властивостей дріжджів *S. carlsbergensis* та бактерій *Z. mobilis*

Показники	<i>Z. mobilis</i>	<i>S. carlsbergensis</i>
Час подвоєння, год	2,5	5,6
Швидкість утворення етанолу, г/(л·год)	5,4	0,8
Вихід біомаси, г/г	0,028	0,082
Вихід етанолу, %	95	90

Істотним *недоліком* бактерій *Z. mobilis* є вузький спектр субстратів, що утилізуються, що обмежується глюкозою, фруктозою і сахарозою. Наявність у *Z. mobilis* множинної резистентності до антибіотиків створює певні труднощі при генетичному конструюванні штамів для розширення спектра субстратів, що утилізуються.

Активними продуцентами етилового спирту є також термофільні бактерії рр. *Clostridium* та *Thermoanaerobacter*. Термофільні бактерії *C. thermocellum* здатні одночасно здійснювати гідроліз рослинних полімерів, і ферментацію до етанолу. У термофілів спостерігається висока швидкість росту та метаболізму,

стабільні ферменти. Культивування їх проводиться при підвищених температурах, в результаті чого розчинність кисню та інших газів зменшується і в середовищі створюються анаеробні умови, що сприяють бродінню. Зі збільшенням температури зменшується в'язкість середовища, підвищується леткість етанолу, що призводить до зменшення витрат енергії за його подальшого виділення. *Термофільні бактерії* синтезують менше біомаси, ніж дріжджі, що обумовлено збільшенням метаболічних витрат на підтримку життєдіяльності термофілів при підвищенні температури і, як наслідок, веде до збільшення виходу спирту. Однак термофіли дуже чутливі до етанолу (інгібуючі концентрації 0,5 % і вище), що не дозволяє поки що розробити ефективний термофільний процес отримання етанолу.

Ще одним прийомом інтенсифікації біосинтезу етанолу є створення генетично змінених штамів спиртоутворюючих дріжджів і бактерій. В даний час роботи в галузі генетичної трансформації спиртоутворюючих мікроорганізмів ведуться у двох напрямках:

- створення штамів, здатних зброджувати невластиві їм цукри;
- створення штамів спиртоутворюючих дріжджів, що мають амілолітичну активність, необхідну для розщеплення крохмалю.

Знайдено види дріжджів, що здатні здійснювати ферментацію пентоз, але вони чутливі до спирту. Поріг цієї чутливості може бути змінений генетичними методами; крім того, шляхом клонування гену ксилозоізомерази дріжджам роду *Saccharomyces* може бути передана здатність споживати ксилозу. Це дозволить їм здійснювати конверсію ксилози (субстрата, на якому вони не ростуть) в ксилулозу (субстрат, який вони зброджують).

Амілолітичні ферменти, що продукуються спиртовими штамми дріжджів, мають відповідати наступним *технологічним вимогам*:

- білки – секретуватися в позаклітинне середовище, а не залишатися пов'язаними з клітинною стінкою дріжджів;
- оптимум *pH* ферментів має перебувати у межах 3,5–5,5;
- температурний оптимум має бути в інтервалі від 35 до 45 °С;
- ферменти повинні мати високу питому активність.

Проблема створення штаму спиртоутворюючих дріжджів, що має амілолітичну активність, може бути вирішена шляхом передачі генів глюкоамілази дріжджам *Saccharomyces diastaticus* методом гібридизації або введенням генів амілолітичних ферментів – α -амілази та глюкоамілази. Однак, незважаючи на значні зусилля дослідників, дотепер немає даних про використання мутантів, отриманих шляхом генетичної трансформації, як

продуцентів етилового спирту в промислових умовах.

Можливе також використання *ацидофільних* (оптимум pH 1,5) і *галофільних продуцентів спирту*, а також змішаних культур мікроорганізмів, здатних здійснювати пряму біоконверсію відходів крохмалю в етанол.

Різко збільшити швидкість спиртового бродіння можна шляхом *імобілізації клітин мікроорганізмів-продуцентів*. При імобілізації активність клітин стабілізується, а субстрат не витрачається на накопичення біомаси, тому вихід спирту підвищується.

Для промислових технологій на основі вільних клітин дріжджів продуктивність реактора за етанолом становить 10 г/(л·год), час повного зброджування близько 5–6 год при вихідній концентрації цукрів 5–10 %. При використанні імобілізованих клітин дріжджів ці показники підвищуються відповідно до 50 г/(л·год) і 15–30 %, а при використанні бактерій продуктивність збільшується до 100 г/(л·год), хоча концентрація цукрів не перевищує 15 %.

Для імобілізації використовують тріску, пористу кераміку, силікагель, альгінат кальцію з частинками кремнію, альгінат алюмінію, караганан, поліакриламід, кріогель полівінілового спирту, фотозшиті полімери. Серед фотозшитих полімерів найбільш перспективними є носії на основі поліетиленгліколю, розміри частинок яких можна легко змінювати, варіюючи ступінь полімеризації.

Недоліком способів імобілізації є необхідність регенерації носія, обумовлена наявністю смолистих речовин і барвників у перероблюваній сировині, що ускладнює процес ферментації в промислових умовах.

Одним зі способів імобілізації, позбавлених зазначеного недоліку, що забезпечують створення системи з високою концентрацією біомаси, є імобілізація на поверхні розділу фаз газ-рідина. Цей спосіб заснований на можливості ряду мікроорганізмів до *флотації*, тобто до закріплення їх клітин на поверхні розділу фаз газ-рідина. Ферментер у такому разі має працювати у *газоемульсійному режимі*. Газоемульсійний режим створюється при інтенсивному барботажі пінистих субстратів і характеризується утворенням двофазної однорідної системи, утвореної дрібними пухирцями. У нижній частині відбувається розшарування газорідинної емульсії на піну та рідину. Дріжджі, закріплені на поверхні бульбашок, спливають у активну зону ферментера, а вільну від клітин культуральну рідину виводять через хибне дно ферментера. Створені в апараті умови дозволяють утримувати в об'ємі реактора дріжджі в концентрації 120–160 кг/м³ при швидкості розведення до 1,2 год⁻¹ без

вилучення клітин з культуральною рідиною. При іммобілізації клітин на поверхні розділу фаз газ-рідина продуктивність реактора по етанолу в 10 разів перевищує ту, що досягається при традиційних способах ведення процесу і в 3 рази більше продуктивності при використанні дріжджів *S. cerevisiae*, іммобілізованих на твердому носії.

Інші способи підвищення швидкості бродіння і виходу етанолу засновані на його видаленні з ферментаційного середовища безпосередньо під час ферментації (режим *in situ*). Для цього може бути використана рідинна екстракція, відведення безклітинного середовища через напівпроникну мембрану (мембранний біореактор), рециркуляція біомаси дріжджовою сепарацією, вакуумна первапорація етанолу через селективну мембрану.

Вихід етанолу з целюлозовмісної сировини можна підвищити, передобробляючи сировину різними методами.

При «паровому вибуху» лігноцелюлоза зазнає перетворення, в результаті яких вона стає більш чутливою до ферментативного гідролізу. При обробці цим методом помірно твердих порід деревини утворюються відходи, придатні для подальшої переробки мікроорганізмами; деревина хвойних і тропічних порід, багатша на лігнін, погано піддається такій обробці.

Інший шлях – розмелювання лігноцелюлози та її обробка великими дозами радіації. При цьому відбувається розрив хімічних зв'язків полімерів, і надалі лігноцелюлоза легше піддається деструкції іншими методами.

Альтернативою хімічному перколяційному гідролізу, а також механічним, фізичним та фізико-хімічним методам передобробки (які вимагають значних витрат енергії, а також супроводжуються підвищеною корозією матеріалів, необхідністю нейтралізації стоків, регенерації розчинника тощо) є ферментативний гідроліз. Його проводять у проточних колонних реакторах, в які завантажують целюлозовмісну сировину і ферменти або культуральні рідини целюлолітичних грибів (рр. *Trichoderma*, *Aspergillus* та ін). Отримані ферментолізати містять значну кількість глюкози, яка може бути зброджена в етанол. Батарея з 10 реакторів об'ємом 200 м³ кожен із продуктивністю 5 г/(л·ч) дозволяє одержати 80 тис. т цукру на рік або 40 млн л спирту на рік.

На жаль, незважаючи на вартість ферментів, яка постійно знижується, ферментативний гідроліз поки ще дорожчий за хімічний. Для проведення ферментативного гідролізу за розробленими на сьогодні технологіями необхідно мати очищену сировину, що містить в основному целюлозу, вільну від геміцелюлоз і лігніну (наприклад, газетний папір, рисова і пшенична

солома), що обмежує використання даного методу. Один з варіантів вирішення цієї проблеми – отримання високоякісної рослинної сировини в результаті ферментативної делігніфікації, проте ефективна промислова технологія делігніфікації деревини поки ще не розроблена. Крім того, делігніфіковану сировину краще використовувати для виробництва паперу, а не біоетанолу. Інший варіант отримання целюлози може бути заснований на створенні рекомбінантних мікросинтезуючих мікробних продуцентів целюлози, зокрема ціанобактерій, що вмають великий репродукційний потенціал.

Зниження собівартості паливного етанолу може бути забезпечене при комплексній переробці сировини, при якій отримують як основні, так і побічні товарні продукти з високою доданою вартістю. Наприклад, під час переробки зерносивини разом з етанолом з частини сировини можна отримувати клейковину, крохмаль (ціна крохмалю вище, ніж спирту), крохмальні та білкові продукти для харчових цілей, одночасно утилізувати рідку вуглекислоту, отримувати випарену або збагачену мікробним кормовим білком барду, інші кормопродукти; при переробці цукрових буряків – етанол, пектин, випарену барду, кормові дріжджі, органічні кислоти і т. п. За оцінками, така комплексна технологія може підвищити рентабельність виробництва більш ніж у 2 рази.

Більш ефективною є *передобробка сировини* з використанням *ферментативного гідролізу* та інших сучасних методів, ретельне моделювання процесів та *оптимізація умов бродіння*, впровадження високопродуктивних біореакторів, енергозберігаючих систем відгону, концентрування та очищення етанолу, комплексна переробка сировини та вторинних ресурсів – додаткові резерви вдосконалення біотехнології отримання етанолу та зниження його собівартості.

Ще один варіант біотехнологічної переробки біомаси в паливо – *конверсія в н-бутанол* (біобутанол). Для його отримання використовується ацетонобутилове бродіння, яке здійснюється бактеріями *Clostridium acetobutylicum*.

Сировиною для виробництва *біобутанолу* можуть бути цукрова тростина, буряк, кукурудза, пшениця, жито, маніока, картопля, рослинні гідролізати, відходи, такі як молочна сироватка.

У порівнянні з етанолом н-бутанол як автомобільне паливо має певні *переваги*:

- більш високе октанове число і енергію згоряння, близьку до такої для бензину;

- може додаватися у більш високих концентраціях до бензину при використанні в стандартних автомобільних двигунах;

- має меншу летючість;
- змішується з бензином і дизельним паливом у будь-яких співвідношеннях;

- негігроскопічний, його суміші з бензином у присутності води меншою мірою схильні до розшарування і тому для використання бутанол-бензинових сумішей не потрібно переоснащення існуючої мережі сховищ, установок для змішування, систем транспортування та автозаправних станцій.

Однак технологія біобутанолу має й певні складні моменти:

- біотехнологія отримання біобутанолу більш складна (потрібні суворі анаеробні та асептичні умови, складно здійснити більш продуктивний безперервний процес культивування);

- вихід з сировини нижче (15–20 %, максимум 25% при споживанні глюкози);

- вище витрати на відгонку, тому і собівартість н-бутанолу значно вища;

- утворений в ході бродіння н-бутанол вже в концентрації 1,5% пригнічує життєдіяльність бактерій і бродіння, тому в процесі не використовуються середовища з великою кількістю субстратів, що зброджуються;

- дуже серйозною є проблема утилізації барди, що залишається після відгону н-бутанолу.

Зниження собівартості бутанолу можливе наступним шляхом:

- часткова заміна сировини на рослинні гідролізати;

- збільшення вмісту н-бутанолу в ферментаційному середовищі;

- підвищення продуктивності реакторів;

- оптимізація технології попутно одержуваних продуктів: ацетону, кормових дріжджів (при переробці барди), водню, вуглекислоти;

- використання методів ферментації, що підвищують ступінь конверсії субстрату в н-бутанол (за рахунок зниження частки ацетону та інших побічних продуктів);

- створення штамів, стійких до високих концентрацій н-бутанолу, у тому числі штамів із зміненим жирнокислотним складом мембран;

- використання ферментативних процесів з одночасним вилученням н-бутанолу з середовища (первапорацією через селективну мембрану, екстракцією розчинами, що не змішуються, та іншими способами);

- застосування високотемпературних анаеробних процесів за участю бактерій *Clostridium thermocellum*, коли одночасно здійснюються і гідроліз субстрату, і ферментація;

- цілеспрямоване конструювання методами метаболічної інженерії

штамів, що утворюють як основний продукт тільки н-бутанол.

Найбільш чутливим до коливань цін на сировину є виробництво н-бутанолу, найменш чутливим – виробництво біоетанолу з гідролізатів деревини.

2.7. Біодобрива та біоінтенсивне землеробство

В Україні накопичено значний досвід переробки різних великотонажних відходів у добрива, виробляється велика кількість малооб'ємних комерційних видів органічних та органо-мінеральних добрив. Багато відходів сільського господарства, гній, послід, осідання стічних вод, барду спиртового виробництва вносять у нативному, непереробленому вигляді. Економічна ефективність їх використання змінюється в широких межах і визначається дозою внесення добрив, їх складом, транспортними витратами та отриманою надбавкою врожаю. Позитивний ефект дає внесення соломи злакових культур, сидерату бобових культур. Неefективним є внесення у ґрунт чистого торфу. Транспортні витрати різко зростають зі збільшенням вологості добрив вище 60 % і радіусу перевезення. Тому частину добрив (пташиний послід, барду) термічно висушують (див. главу 1) і вносять у сухому вигляді. Інші органічні та органо-мінеральні добрива, більш збалансовані за складом поживних речовин, отримують змішуванням з різними відходами, мінеральними та органічними добавками, наповнювачами.

Сучасні біотехнологічні підходи, удосконалені методи компостування і вермикомпостування, аеробної стабілізації і ферментації, анаеробного зброджування і метаногенерації дозволяють переробляти різні органічні відходи в органо-мінеральні добрива, зручна цінність яких вище, ніж вихідного матеріалу. Стимулюючи життєдіяльність мікрофлори біодобрив або додаючи в них регулятори росту рослин та мікроорганізми з цінними для рослин властивостями, можна підвищити не тільки родючість ґрунтів, а й стійкість рослин до захворювань та сільськогосподарських шкідників, зменшити вміст шкідливих речовин (нітратів, важких металів та ін.) у рослинному матеріалі.

Переробку твердих відходів у біодобрива проводять методами компостування та вермикомпостування, твердофазної аеробної ферментації.

Добрива з відходів з невисоким вмістом твердої фази отримують з використанням аеробної стабілізації (рідкого компостування), метаногенерації, глибинної рідиннофазної аеробної ферментації, прискореної аеробної ферментації з внесенням мікробних культур. При анаеробній обробці вихід

добрив значно нижчий, ніж при аеробній; зв'язані азот і фосфор переходять у водорозчинні амонійні іони і фосфати, спостерігається виділення аміаку, тому втрати поживних речовин, що містяться у вихідному матеріалі, є вищими. Однак добрива, отримані на основі мулу метантенків, містять низьку кількість патогенної мікрофлори та багато різних біостимуляторів, що сприяють отриманню високих урожаїв.

Гній тваринницьких комплексів, послід від птахівницьких підприємств, біомасу мікроорганізмів, активний мул очисних споруд, що містять високі кількості азоту, доцільно переробляти разом з відходами, збідненими азотом, наприклад післяспиртовою бардою, целлюлозовмісними матеріалами. Для отримання продукту з оптимальним балансом поживних речовин і споживчими властивостями в масу, що переробляється, можуть вносити мінеральні добрива, різні наповнювачі (торф та ін).

Використовувана технологія має бути маловитратною, забезпечувати ефективне засвоєння біогенних речовин, збереження властивостей продукту при тривалому зберіганні, сипкість і незлежуваність продукту (для добрив у твердій формі), можливість внесення продукту переробки відходів у будь-які терміни вегетації та у досить великій кількості.

Для забезпечення необхідних якостей та зручності застосування технологія отримання твердої товарної форми біодобрив може включати *стадії* зневоднення, сушіння та грануляції. Для зневоднення зазвичай використовують шнекові центрифуги та барабанні вакуум-фільтри, для сушіння та грануляції – стрічкові та барабанні сушарки та гранулятори, сушарки у киплячому шарі, екструдери.

У ряді країн розроблено еколого-санітарні умови використання одержуваних з відходів добрив, що регламентують вміст шкідливих речовин у добривах, сфери застосування, дози та умови внесення їх на сільськогосподарські поля. Вони є найбільш жорсткими для опадів стічних вод, внесених на поля. У Швеції, наприклад, доза внесення опадів в ґрунт не має перевищувати 5 т/га по сухій речовині при періодичності внесення опадів 1 раз на 5 років, у Німеччині та Великій Британії – 1 раз на 3 роки. У Німеччині за такого регламенту ГДК у ґрунті буде досягнуто через 210 років сільськогосподарського використання при утилізації на полях 80 % опадів стічних вод, що отримуються в країні.

Найбільш суворі обмеження за вмістом токсичних речовин застосовуються для добрив, що вносяться на сільськогосподарські поля під продовольчі культури. Основний контроль рекомендується здійснювати за

концентрацією кадмію: його вміст не має перевищувати 30 мг/кг сухої речовини осаду. Внесення у ґрунт має здійснюватися розкидувачами, що забезпечують рівномірний його розподіл по площі, що удобрюється.

При внесенні опадів із низьким значенням pH на ґрунти з $pH > 5,5$ вони попередньо оброблюються вапном.

Підбір вирощуваних культур, складу відходів, що переробляються, і різних добавок та облік характеру ґрунтів, вмісту в них гумусу, доступного азоту та фосфору, їх гранулометричного складу, pH , швидкості мінералізації осаду дозволяють зменшити накопичення шкідливих речовин у рослинах. Допустима доза внесення опадів нижче на ґрунтах з низькою катіонообмінною ємністю, слабогумусованих, піщаних, закислених і зростає на ґрунтах з більш високим вмістом гумусу, з високою катіонообмінною ємністю, на глинистих, нейтральних і слаболужних.

У деяких країнах визначення допустимих норм вмісту важких металів у ґрунті використовується показник – цинковий еквівалент (ЦЕ):

$$\text{ЦЕ} = \text{Zn} + 2\text{Cu} + 8\text{Ni} \quad (2.11).$$

(порівняльна токсичність $\text{Zn} : \text{Cu} : \text{Ni} = 1 : 2 : 8$)

Допустима кількість внесених добрив M , що містять важкі метали:

$$M = \frac{A - B}{C} \cdot \frac{1000}{D} \quad (2.12)$$

де A – допустима межа внесеної кількості металу у верхньому шарі ґрунту глибиною 0,2 м, B – фонові кількість даного елемента у верхньому шарі ґрунту глибиною 0,2 м, кг/га, C – загальна концентрація металу у добривах, що вносяться, г/т сухих речовин, D – період асиміляції важких металів, приймають 30 років в активному шарі ґрунту глибиною 0,2 м.

За нормативними показниками ведеться розрахунок доз опадів на сільськогосподарських територіях. При розрахунку дози опадів беруться до уваги дані екологічного контролю: вміст важких металів (свинцю, кадмію, міді, нікелю, ртуті, цинку) у ґрунті та опадах, загального азоту, рухомого фосфору, калію, кількість бактерій групи кишкової палички, pH ґрунту та опадів. Аналізується вміст забруднень в отриманій сільськогосподарській продукції.

Для отримання добрив у разі високого вмісту шкідливих речовин у відходах останні необхідно знезаражувати та знешкоджувати, витягувати з них

забруднення.

Добрива, що отримуються переробкою гною, посліду, опадів стічних вод, часто містять підвищену кількість умовно-патогенних організмів: ентеробактерії, анаеробні клостридії, сальмонели, клебсієли, мікобактерії, яйця гельмінтів, інші паразити.

Традиційним прийомом знешкодження таких відходів, як опади очисних споруд, є витримування їх на відкритих мулових майданчиках, картах або лагунах протягом тривалого часу: залежно від кліматичних умов від 1 року до 3 і більше років. Однак у зв'язку з дефіцитом вільних територій цей прийом для складування та знешкодження опадів все менше використовується.

Більш *інтенсивними методами переробки відходів у добрива* є компостування, анаеробне зброджування в термофільних умовах, аеробна стабілізація з попереднім прогріванням, що забезпечують загибель патогенних мікроорганізмів, яєць гельмінтів та практично повне знезараження відходів. З інших *методів знезараження* можуть застосовуватися термічні (прогрів і пастеризація, сушіння), термомеханічні, хімічні (вапнування, обробка іншими хімічними речовинами), а також різні фізичні впливи (радіація, струми високої частоти, інфрачервоне та ультрафіолетове опромінення).

У *термічних* методах, зокрема при знезараженні активного мулу очисних споруд, використовуються контактні апарати з занурюваними горілками, з подачею гострої пари або теплообмінники та реактори-пастеризатори, що забезпечують прогрівання всієї маси мулу до температури не менше 60 °С. Використовуються і жорсткіші умови – при підвищеному тиску і температурі до 200 °С. Обробка при вищій температурі дозволяє знищити як яйця гельмінтів і патогенні мікроорганізми, так і віруси. Знезараження пастеризацією опадів очисних споруд, призначених для використання як добрива, проводиться при 65–70 °С та витримуванні 20–30 хв. Вищий ефект пастеризації досягається при нагріванні осаду до 80–90 °С з подальшим витримуванням протягом 5 хв.

Термічні методи знезараження вимагають високих витрат енергії, що є їхнім недоліком. Після пастеризації можливе повторне зростання ентеробактерій, тому потрібна додаткова обробка опадів, наприклад, анаеробним зброджуванням.

Більш стійку ефективність знезараження забезпечує *термічна сушка* механічно зневоднених опадів. Для знешкодження та одночасної сушіння активного мулу можуть застосовуватися розпилювальні сушили та сушарки-гранулятори, каталітичні генератори тепла з м'яким режимом сушіння, що

запобігає спіканню органічних речовин, радіаційний метод із джерелами інфрачервоного випромінювання.

Зберігання термічно висушеного осаду рекомендується проводити в штабелях (буртах) масою не менше 100 т, укритих поліетиленовою плівкою або торфом, соломною, ґрунтом (шаром 15-20 см).

При *термомеханічному знезаражуванні* опади механічно зневоднюються, інтенсивно перемішуються в лопатевих змішувачах при підвищенні температури, термостабілізуються при 60–70 °С і гомогенізуються.

Хімічна обробка окислювачами – хлором, озоном, пероксидом водню дозволяє ефективно дезінфікувати та дезодорувати рідкі або зневоднені відходи. Ефективна обробка негашеним вапном, що забезпечує загибель яєць гельмінтів в результаті підвищення *pH* до 11–12 і температури до 60 °С в процесі гасіння. Доза вапна залежить від вологості маси, що знезаражується. Для зменшення витрати вапна проводять попереднє згущення і зневоднення рідких відходів. При вологості зневодненого на фільтр-пресах сирого осаду стічних вод 70–85 % вносять в середньому 15–20 % вапна (у вигляді меленого СаО). Час експозиції для знезараження від вірусів та бактерій становить від 2 годин до доби та більше.

Застосування вапна дозволяє використовувати його подвійну дію – як знезаражувального засобу, і одночасно ґрунтового меліоранту, що призводить до зниження експлуатаційних витрат на обробку відходу, підготовку його до утилізації як добрива та депонування в ґрунті. Внесене вапно запобігає реактивації санітарно-показових мікроорганізмів і підтримує стабільність відходів при зберіганні, підвищує *pH* відходів і ґрунту, зв'язує важкі метали і переводить їх у нерозчинну форму, що знижує ризик контамінації навколишнього середовища цими хімічними елементами. Реагентні опади стічних вод, які пройшли попередню обробку вапном, не загнивають, позбавлені неприємних запахів, зручні для транспортування, зберігання та внесення у ґрунт. Вносяться вони насамперед під озимі культури, а також технічні (крім льону та картоплі), які споживають багато кальцію.

Можлива обробка такими дезінфікуючими засобами, як аміак (аміачна вода), формальдегід, масляний альдегід, і пестицидами, які самостійно застосовуються або для удобрення ґрунту, або для знищення шкідливих ґрунтових мікроорганізмів або бур'янів.

При знезаражуванні осаду з очисних споруд аміачною водою він попередньо зневоднюється на центрифугах, потім перемішується з аміачною водою в змішувачах безперервної дії, що додається в кількості 5–12 % від маси

зневодненого осаду (залежно від вмісту NH_3 в аміачній). Оброблений осад вивантажується у закриті контейнери. Температура реагентної суміші підтримується лише на рівні 16–22 °С. Час, необхідний для знезараження осаду, становить 15 діб. Обробка рідким аміаком дозволяє обробляти осад прямо на мулових майданчиках без попереднього зневоднення. Придатний для обробки осад з вологістю 80–82 %. Рідкий аміак у кількості 4 % від маси осаду вноситься в шар осаду за допомогою тракторного агрегату на глибину 20–24 см. Час, необхідний для знезараження осаду, становить 10 діб.

Інші дезінфікуючі засоби (хлорне вапно, спирт, хлороформ, ефір, фенол та ін) застосовуються рідко і при обробці невеликої кількості відходів, оскільки їх застосування пов'язане з великими витратами.

Окрема самостійна проблема – зменшення вмісту *важких металів* та інших забруднень у відходах, що використовуються. В даний час відомо багато досить простих в апаратурному оформленні способів вилучення шкідливих домішок з відходів.

Видалення важких металів можливе за допомогою *підкислення* оброблюваного матеріалу (або лужної та кислотної обробки). Швидкість розчинення та ефективність видалення металів зростають зі збільшенням часу підкислення, співвідношення рідкої та твердої фаз, зменшенням рН середовища.

Метали далі можна *ресорбувати* на спеціальних біополімерах, а з них витягувати метал.

Тяжкі метали можуть бути вилучені із забрудненої маси біови-*лужуванням* за допомогою тіобактерій та залізобактерій. При цьому токсичні компоненти переводять у розчинений стан, вимиваються і потім видаляються з розчину осадженням. Отриманий осад важких металів може використовуватися як товарний продукт подальшої металургійної переробки.

Незважаючи на велику кількість методів і технологій, запропонованих для вилучення забруднень, всі вони ведуть до істотного подорожчання добрив, що одержуються з відходів, і часто супроводжуються утворенням вторинних відходів та забруднень, наприклад у вигляді шламів сірчанокислотної обробки, тому на практиці віддають перевагу відходам з високим вмістом забруднень *захороняти* або *спалювати*.

Застосування біодобрив із відходів, що задовольняють санітарно-гігієнічним та екологічним вимогам, є складовим елементом агротехнологій *біологічного* та *біоінтенсивного землеробства*, адаптивного землеробства, інтегрованої системи захисту рослин. Вони відносяться до більш екологічно

чистих технологій вирощування сільськогосподарських культур і дозволяють підтримувати постійну родючість ґрунтів, їх структуру та стійкість до ерозії. Продукція, вирощена з використанням таких технологій, вищої якості і коштує в кілька разів дорожче, ніж отримана із внесенням у ґрунти гною, мінеральних добрив чи пестицидів.

Ефективними є біодобрива і при *ремедіації* та *рекультивації* техногенно порушених земель для повернення їх у господарське користування.

Широко використовувані інтенсивні технології землеробства з внесенням мінеральних добрив і хімічних пестицидів, розвиненою системою меліорації різко підвищують врожайність рослин і поки що дешевші порівняно з біологічним землеробством, але одночасно вони супроводжуються підвищеними енерговитратами (співвідношення енерговитрат на отримання продукції та енергії, укладеної в ній, в середньому становить 7 : 1), призводять до прискореного споживання природних ресурсів агроecosystem, збіднення ґрунтової біоти, ерозії ґрунтів, евтрофікації поверхневих водоем, хімічного забруднення біопродукції нітратами, пестицидами і т.д.

Технологія *біологічного землеробства* розглядається як можливість досягнення безвідходності, екологічної чистоти при збереженні рентабельності рослинництва і тваринництва і в даний час широко практикується в багатьох аграрно- та індустріально розвинених країнах. Біологічна система землеробства передбачає:

- мінімальну механічну обробку ґрунту (наприклад, використання плоскорізної оранки замість відвальної) та інші агроприйоми, націлені на збереження нормальної структури ґрунту в умовах більш інтенсивного кругообігу речовин;

- відмова від мінеральних добрив, хімічних засобів захисту рослин, гормонів, генетично модифікованих організмів; широке використання біодобрив, зелених добрив (сидератів), біопрепаратів азотфіксаторів, мікроорганізмів, що покращують доступ фосфору до рослин та інших корисних мікроорганізмів, біологічних засобів захисту рослин;

- раціональна сівозміна з культивуванням зернобобових культур; впровадження полікультур – вирощування кількох культур одночасно на одній ділянці таким чином, щоб збирання врожаю однієї з них та посів іншої йшли одночасно, не залишаючи ґрунт оголеним;

- активну боротьбу з ерозією ґрунтів, полезахисне лісорозведення, снігозатримання, використання мульчованих відходів для збереження вологи,

захисту від ерозії, покращення структури ґрунту, придушення зростання бур'янів, використання краплинного зрошення;

– ландшафтний принцип ведення сільського господарства – з урахуванням оптимального співвідношення лісу, луки, дзеркала вод і ріллі.

Завдання біоінтенсивного землеробства – отримання необхідного набору продуктів із мінімальної площі. У його основі лежать технології, переважно орієнтовані на «вироснування», отримання штучного ґрунту, а не самих рослин. Для цього використовуються різноманітні прийоми спільної конверсії мінеральних та органічних матеріалів, підвищення чисельності та корисної активності ґрунтової мікрофлори та мезофауни, а також особлива агротехніка вирощування рослин.

Типовий процес отримання штучного ґрунту в грядках включає 5 етапів:

- 1) з'ясування мети застосування ґрунту;
- 2) визначення основних компонентів ґрунту;
- 3) мікробіологічна та біохімічна конверсія з дезінфекцією (гарячим розкладанням);
- 4) конструювання ґрунтового профілю;
- 5) контроль та забезпечення якості ґрунту.

Після ретельного аналізу місцевих умов визначаються компоненти та їх співвідношення для одержання штучного ґрунту, відповідний ступінь агломерації, що є вкрай важливим для успішної реалізації технології. На цьому етапі може використовуватися комп'ютерна обробка даних та моделювання для складання оптимальної комбінації матеріалів з усіма іншими складовими і добавками. Усі інгредієнти перевіряються на вміст токсичних та патогенних речовин в уповноваженій лабораторії.

Перед використанням може знадобитися модифікація ґрунтових компонентів (подрібнення, запобігання утворенню пилу, зволоження або підсушування, дезодорація або внесення добавок, що запобігають появі запаху). Як *органічні компоненти* можуть використовуватися опади з очисних споруд, солома, обрізки дерев і кущів, скрап деревини, тирса, кора, скошена трава, пакувальні матеріали (картон, папір) та ін.

Мінеральними складовими може бути тонкий та грубий пісок, глина. Компоненти перемішуються, до них додаються за необхідністю мінеральні добрива, рН-коригуючі добавки. Місця для складування підготовленої суміші готуються з урахуванням кількості атмосферних опадів. Надлишок води уловлюється в збірні ями, зберігається в резервуарах і використовується при необхідності для зволоження матеріалу, що дозріває в грядках.

Розміри гряд не перевищують за висотою 1,5–1,8 м і шириною в основі 2,5–3,0 м. Періодично ці гряди розпушуються спеціальними машинами.

У процесі аеробної конверсії, багато в чому аналогічного компостуванню в термофільних умовах, популяція ґрунтових мікроорганізмів адаптується, колонізує органічну речовину, трансформує її спільно з мінеральною складовою. У ході трансформації склад газу та температура постійно контролюються, щоб гарантувати розкладання матеріалу у необхідних умовах.

Протягом декількох місяців під впливом ґрунтових мікроорганізмів вся маса трансформується в новий матеріал («сира гумифікована речовина»), яку важко відрізнити від натурального ґрунту. Після проведення необхідних аналізів отриманий «сирий гумифікований субстрат» перемішується з іншими добавками і піддається процесу реального гумифікування.

Перед застосуванням отриманий «ґрунт» аналізується на відповідність екологічним та агротехнічним вимогам і у разі відповідності використовується за призначенням. При належному дотриманні технології такий штучний ґрунт має міцну агрегатну структуру, містить оптимальні кількості поживних елементів, при цьому на відміну від інших штучних субстратів у ньому не відбувається загнивання коренів.

Описаний процес одержання ґрунту може бути використаний для переробки забруднених матеріалів, що містять токсичні речовини, такі як поліароматичні вуглеводні, поліхлоровані дифеніли, діоксини та бензофурані, пестициди, які утворюють міцні зв'язки з гумусом та стають важкодоступними для рослин.

Біологічний спосіб ведення землеробства передбачає спільне використання всіх доступних форм придушення шкідників сільськогосподарських культур (включаючи агротехнічні, біологічні, хімічні та інші методи) із заміною хімічних пестицидів методами біологічної боротьби у всіх випадках, в яких це технічно можливо. Такий підхід, який отримав назву *інтегрованої системи захисту рослин*, орієнтований на максимальне збереження врожаю не тотальним знищенням шкідливих видів за будь-яку ціну, а шляхом контролю чисельності їх нижчою від економічного порога шкідливості з мінімально можливими прямими витратами та непрямими економічними втратами, пов'язаними зі збитками для навколишнього середовища (табл. 2.6). Ця система передбачає знання популяційної динаміки рослин, організмів, що їх споживають, збудників захворювань рослин, природних ворогів фітотрофів – хижаків, паразитів, патогенів, оцінку взаємовідносин між ними та навколишнім середовищем, а також врахування

вимог екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки як для виробників, так і для споживачів сільськогосподарської продукції.

Таблиця 2.6. Особливості інтегрованого захисту рослин у порівнянні з традиційною боротьбою зі шкідниками сільського господарства

Особливості системи захисту рослин	Традиційний захист рослин як тотальна боротьба зі шкідниками	Інтегрована система
Вихідна концепція агрооб'єкта	Поле – «механізм», конвеєр, що має зайву ланку (бур'яни, шкідники, патогени), яку можна і потрібно знищити без шкоди для конвеєра та його продукції – врожаю	Поле – екосистема зі складними міжвидовими зв'язками та саморегуляцією. Повне знищення видів екосистеми може порушувати її здатність до саморегуляції
Тактичні цілі	Повне знищення видів, що завдають економічної шкоди	Зниження чисельності небажаних організмів нижче порога суттєвої економічної шкоди
Основні засоби	Хімічні пестициди як головна зброя	Екологічно раціональний комплекс різноманітних впливів на агроекосистему, заснований на аналізі біо-геоценозу конкретного поля та на прогнозуванні розвитку біоценозів
Переваги	Візуально спостерігається загибель організмів та економічний ефект негайно після застосування пестицидів Успіх часто виявляється лише тимчасовим чи ілюзорним	Стабільний урожай високої якості, зниження забруднення середовища, зниження шкоди здоров'ю людей та шкоди природі
Недоліки та обмеження	Поява стійких рас і форм шкідників, забруднення середовища, шкода здоров'ю людей, шкода природі.	Необхідність навчання персоналу, наукових розробок, підвищення культури землеробства, вищі економічні витрати
Екологічна безпека	Різко порушується	Зберігається

Використання хімічних пестицидів при інтегрованій боротьбі допустимо тільки після застосування механічних і біологічних засобів захисту (таких як передпосівна обробка полів, культивуація, провокаційний полив з подальшою обробкою сходів бур'янів, маніпулювання режимами затоплення та скидання води і т. ін.).

Як біологічні засоби захисту рослин використовуються природні вороги шкідливих комах і збудників захворювань, біопестициди на основі бактерій (*Bacillus thuringiensis*, *B. subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. aureofaciens*, *Streptomyces avermitilis*, *S. lavendulae*, *S. griseus*, *Rhizobium japonicum*), грибів

(*Beauveria bassiana*, *Trichoderma viridae*, *T. lignorum*, *T. harcianum*, *Trichothecium roseum*) та вірусів (вірусів ядерного поліедрозу), антибіотики, природні екологічні хеморегулятори розвитку фітопатогенів та фітофагів, їх аналоги (феромони, атрактанти, репеленти, гормони льонки, ювенільні гормони, антифіданти, фагодетеренти та ін), засоби залучення ентомофагів (кайромони).

Біодобрива та біостимулятори на основі мікроорганізмів, біостимулятори та біорегулятори росту рослин на основі природних хімічних сполук (фітогормони ауксини, гібереліни, цитокініни; інгібітори росту, антитранспіранти, протисходові засоби, ретарданти, імуностимулятори, активатори фотосинтезу, активатори розкладання стерні), мікробіологічні препарати, що прискорюють розкладання пестицидів після їхньої обробки полів, розширюють арсенал засобів біологічних і інтегрованих систем землеробства. Ці системи дуже конкретні і специфічні стосовно локальних умов. Процес удосконалення подібних систем має бути безперервним і спиратися на знання новітніх прогресивних розробок у галузі біотехнології та ведення раціонального сільського господарства.

2.8. Біодеструкція рослинних полімерів та матеріалів

Біодеструкція проводиться з метою мінералізації, зменшення маси чи вибіркового розкладання певних компонентів відходів. Велику частку у складі твердих відходів становлять полімери природного походження, багато з яких є дуже стійкими до біологічного впливу.

Біодеструкція природного полімеру *лігніну* і *лігніновмісних матеріалів* – важлива проблема для целюлозно-паперової та деревообробної промисловості. Мінералізація целюлозовмісних матеріалів має значення при вирішенні задач компактизації відходів, наприклад радіоактивних, при біологічному очищенні стічних вод. Гідроліз целюлозовмісних матеріалів є важливим для створення сировинної бази для отримання біопалива (див. п. 2.6).

У розкладанні та мінералізації природних рослинних полімерів беруть участь аеробні та анаеробні *мікроорганізми-гідролітики*, які синтезують ферменти, що розщеплюють біополімери до простих цукрів або жирних кислот. Продукти гідролізу можуть надходити в клітини гідролітиків і супутніх мікроорганізмів і метаболізуватися до CO₂ та H₂O (рис. 2.23).

Мікроорганізми-деструктори природних високомолекулярних сполук здатні розкласти не тільки природні полімери і пов'язані з ними забруднення,

наприклад у складі твердих відходів, але і синтетичні полімерні матеріали, що потрапляють в навколишнє середовище у великій кількості.

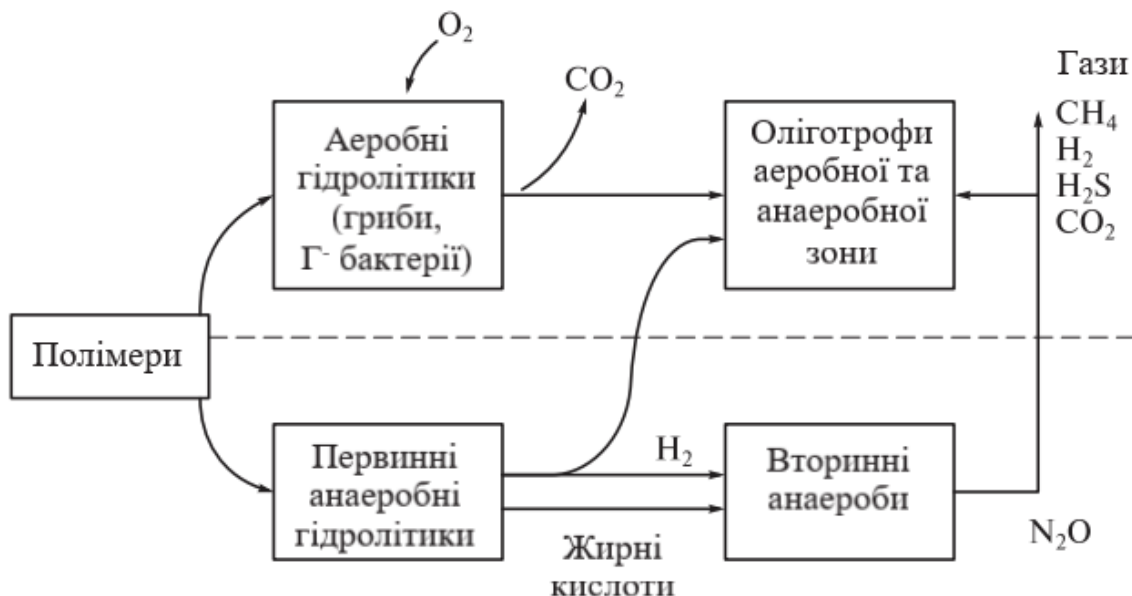


Рис. 2.23. Схема мікробного розкладання природних полімерів

Розкладання рослинних залишків, деревини в природі відбувається в ході сукцесії з колонізацією лігноцелюлозних залишків сапрофітними грибами, які метаболізують легкозасвоювані сполуки (цукри та ін), наступним переважним розвитком грибів, що розкладають целюлозу; розвитком та домінуванням деструкторів лігніну на заключному етапі. Найбільш активні деструктори деревини – *гриби білої та бурої гнилі*.

Розкладання *целюлози* – найбільш поширеного рослинного полімеру – відбувається в результаті симбіотичної взаємодії різних мікроорганізмів та їх складних целюлолітичних систем. У аеробних умовах значна роль належить грибам, найбільш активні біодеструктори – гриби рр. *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Fusarium* та ін.

З *бактерій* у розкладанні целюлози беруть активну участь мікобактерії та таксономічно близькі до них групи. Целюлолітичні ферменти є складним позаклітинним ферментативним комплексом. Целобіоза і глюкоза, що утворюються, пригнічують синтез целюлолітичних ферментів. Природними інгібіторами целюлаз є фенольні сполуки та танніни.

Механізм гідролізу або спосіб дії ферментів на целюлозу та целюлозні комплекси принципово однаковий, незалежно від їх походження. Гідролізу целюлози передують адсорбція целюлолітичних ферментів на лігноцелюлозному субстраті. Адсорбуємість ферментів залежить як від субстрату, і від виду

мікроорганізмів. Цим зумовлені основні відмінності у швидкості гідролізу целюлози целюлолітичними комплексами мікроорганізмів.

Найбільш адсорбуються ферменти грибів *Trichoderma viride* і *Trichoderma reesei*, які як промислові препарати використовують для гідролізу целюлозовмісну сировину. На швидкість ферментативного гідролізу лігноцелюлози впливають питома поверхня та ступінь аморфності целюлози.

Чим вище ступінь аморфності целюлози (нижче ступінь кристалічності), тим більша швидкість дії ферментів. Швидкість ферментативного гідролізу пропорційна питомій поверхні аморфної частини. Ступінь полімеризації та середній розмір частинок вихідної кристалічної целюлози не впливають на ефективність її ферментативного гідролізу. *Ступінь аморфності целюлози можна підвищити* попередньою обробкою сировини механічними, фізико-хімічними та хімічними методами.

Деструкція целюлози можлива і в результаті *окисних* біокаталітичних реакцій, що перетікають за участю пероксиду водню. Ці реакції мають велике значення при руйнуванні лігніну грибами білої гнилі *Phanerochaete chrysosporium* та ін. Аналогічні окисні реакції виявлені і в інших мікроорганізмах, що розкладають целюлозу: *Polyporus adustus*, *Trichoderma viride*, *Myrothecium verrucaria*.

В *анаеробних* умовах ферментативний гідроліз целюлози найчастіше здійснюється мезофільними та термофільними кластридіями. Продукти гідролізу зброджуються до масляної кислоти, етанолу, оцтової кислоти, водню, CO₂ та інших низькомолекулярних сполук, які метаноутворюючі бактерії трансформують до метану.

Змішані культури мікроорганізмів розкладають целюлозу швидше, ніж монокультури, що обумовлено асиміляцією накопичених продуктів розкладання та усуненням їх інгібуючої дії, а також утворенням факторів росту або синергізмом ферментних систем симбіонтів, наприклад геміцелюлаз целюлолітичного організму та систем зброджування.

Біодеградація іншого рослинного полімеру – *лігніну* відбувається в результаті *окисного* процесу, що здійснюється в першу чергу грибами бурої, м'якої та білої гнилі. Якщо розпадаються переважно целюлоза і геміцелюлози, а лігнін клітинної стінки рослин не розкладений або розкладений незначно, деревина набуває бурого забарвлення. Червоні, бурі деструктивні гнилі, викликані березовою губкою *Piptoporus betulinus* та іншими грибами, супроводжуються розпадом деревини як би на кубики. Ці гриби відносять до збудників бурої гнилі.

Гриби бурої гнилі (*Coniophora puteana*, *Trichoderma viride* та ін) мають потужний комплекс гідролітичних ферментів, що розщеплює полісахариди деревини і лише трохи зачіпає лігнін. Ці гриби до початку деполімеризації целюлози окислюють легкозасвоювані цукрб з утворенням пероксиду водню, який бере участь у розщепленні кристалічної целюлози. Лігнін піддається лише деметилюванню. Ферментні системи розриву ароматичних кілець і засвоєння продуктів окислення, що утворюються, у грибів бурої гнилі відсутні.

Гриби м'якої гнилі (аскоміцети та дейтеромицети *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria* та ін.) використовують в основному вуглеводи деревини та беруть участь у реакціях деметоксилювання та дегідроксилювання лігніну.

Гриби білої гнилі спочатку руйнують лігнін, утворюючи переважно білі (корозійні) гнилі. Більшість цих грибів – вищі базидіоміцети, наприклад плоский трутовик (*Ganoderma applanatum*), окремі види *Fomes* (справжні трутовики), опеньки (*Armillariella*), різнокольорова шкіряста губка (*Trametes versicolor*), *Phanerochaete chrysosporium* *Pleurotus ostreatus* (*Sporotrichum pulverulentum*), вешенка устрична *Polyporus versicolor*), *Poria subacida*, *Panus conchatus* та ін.

Гриби білої гнилі – єдина група мікроорганізмів, що розкладають всі компоненти рослинної маси, що обумовлено синтезом ними великого набору гідролітичних та окисних ферментів, а також високою адсорбційною здатністю міцелію в субстрат. Спочатку гриби білої гнилі руйнують лігнуглеводний комплекс, а потім розкладають лігнін та целюлозу. Гриби білої гнилі деполімеризують полісахариди до простих цукрів, в результаті утилізації яких отримують додаткову енергію для розщеплення більш стійкого лігніну. При окисленні ними цукрів може утворюватися H_2O_2 , що бере участь у деструкції рослинних полімерів.

Всього в процесі деструкції лігноцелюлози грибами білої гнилі беруть участь більше десяти різних ферментів, з яких найбільш значну роль виконують

- лігніназа (лігнінпероксидаза),
- манган-залежна пероксидаза (марганцева пероксидаза),
- лакказы (позаклітинна оксидаза),
- тирозиназа (фенолоксидаза).

Як окислювальні агенти вони використовують H_2O_2 , O_2 й окислені форми Mn. Ці ферменти безпосередньо атакують макромолекулярні структури (лігнін та гумінові кислоти) з утворенням радикалів та реакційних частинок – посередників руйнування: H_2O_2 , $O^{\bullet-}$, феноксильних радикалів. При цьому одна частина фрагментів, що утворюються, безпосередньо мінералізується

лігнолітичними ферментами (марганець-залежною пероксидазою). Інша частина деполімеризується з утворенням низькомолекулярних компонентів, які метаболізуються всередині клітини.

З грибів до найбільш активних деструкторів рослинних полімерів і тих, що мають найбільше практичного значення, відноситься гриб білої гнилі *Phanerochaete chrysosporium*. З його використанням розроблено низку технологій делігніфікації деревини та розкладання рослинних залишків.

З біодеструкторів лігніну крім грибів білої гнилі виділяють гриби, що розкладають лісову підстилку, зокрема гриби базидіоміцети *Agaricus bisporus* (шампінйон), *Coprinus comatus* (копринус), *Stropharia* (строфарія) та ін.

Частково розкладають лігнін та прокаріоти: актиноміцети р. *Streptomyces*, бактерії рр. *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Nocardia*, *Pseudomonas*. Ці мікроорганізми відіграють важливу роль у деградації лігніну в нейтральних і лужних ґрунтах, в яких лігнолітичні гриби не можуть конкурувати з ними. Актиноміцети беруть участь у деметилуванні ароматичних кілець молекули лігніну, окисленні бічних ланцюгів та розщепленні ефірних зв'язків. Вони переводять лігнін в розчинний стан, але його повністю не мінералізують. Бактерії мінералізують лігнін у процесах сумісного окислення, кометаболізму, зокрема у присутності глюкози. Анаеробні мікроорганізми не руйнують лігнін, але анаеробні бактерії р. *Clostridium* здатні трансформувати аліфатичну частину лігніну.

Для розриву полімерних ланцюгів та деструкції ароматичних залишків чистого лігніну, виділеного з деревини, потрібні високі енергетичні витрати, тому більшість грибів здійснюють його деструкцію лише за наявності додаткового джерела вуглецю та енергії: целюлози, геміцелюлози, цукрів або низькомолекулярних проміжних продуктів. Лігнін руйнується одночасно з утилізацією полісахаридів, пригнічує ферментативне розщеплення целюлози.

У ґрунті природний лігнін розкладається лігнолітичними мікроорганізмами за кілька років, частково мінералізуючись, частково беручи участь в утворенні ґрунтових гумінових і фульвокислот. В оптимальних умовах деякі змішані культури мікроорганізмів розщеплюють лігнін на 40–55 % через 15–20 діб. В аеротенці при очищенні стічних вод, що утворюються у виробництві деревноволокнистих плит, лігнін розкладається протягом 3–5 діб.

Гриби, що розкладають лігнін, можуть деполімеризувати і *гумінові речовини*. Водночас промисловий лігнін, наприклад лігносульфонат, найважче піддається біодеградації.

Властивість мікроорганізмів деструктувати лігновуглеводну матрицю,

розкласти феноли і лігнін до CO₂ можна використовувати в целюлозно-паперовому виробництві з метою заміни енергоємних механічного і хімічного процесів делігніфікації на біологічний для отримання високоякісних сортів паперу, а також під час виробництва кормів для жуйних тварин, що легко перетравлюються. Важливо й те, що гриби можуть брати участь у розкладанні багатьох ксенобіотиків. Цю здатність можна використовувати при переробці та знешкодженні забруднених рослинних відходів. Прискорене розкладання поживних рослинних залишків при внесенні біодеструкторів може використовуватися при передпосівній підготовці ріллі.

Найбільший практичний інтерес становлять гриби білої гнилі, що вибірково (до 98 %) делігніфікують деревину. Однак мікробіологічна делігніфікація – досить тривалий і недостатньо вивчений процес.

Лігнін та полісахариди перешкоджають проникненню лігнолітичних та целюлолітичних ферментів у рослинний субстрат та його модифікації. Біодоступність рослинних полімерів і матеріалів залежить від їх фізико-хімічних та структурних властивостей, тому, впливаючи на субстрат механічними, фізичними та хімічними методами, можна збільшити швидкість біоконверсії та біодеструкції. З *механічних* методів застосовують подрібнення, з *фізичних* – нагрівання при підвищеному тиску, вплив іонізуючими випромінюваннями, з *хімічних* – розведені мінеральні кислоти і луки при підвищених тиску і температурі, передобробку окислювачами: озоном, перексидом водню. Використовують і передобробку сировини *ферментними* препаратами, отриманими на основі целюлолітичних грибів.

Комплексний процес, що поєднує послідовно хімічну або іншу обробку субстрату та біотехнологічну стадію, може бути ефективним для *модифікації* та *біодеструкції лігноцелюлозних матеріалів*.

Для проведення біодеструкції та біоделігніфікації рослинних матеріалів можна використовувати методи *твердофазної* та *рідкофазної ферментації* в періодичних і проточних умовах. Важливо забезпечити доступ кисню в ферментоване середовище, оптимальну концентрацію азоту, наявність додаткових субстратів, що сприяють індукції целюлолітичних і лігнолітичних ферментів, необхідний стан та оптимальні умови підготовки посівного матеріалу.

Високі концентрації мінерального азоту можуть пригнічувати лігнолітичну активність, зокрема гриба *Phanerochaete chrysosporium*. Відомі також гриби, лігнолітична активність яких не інгібується, а підвищується при високих концентраціях азоту в середовищі.

Перемішування субстрату покращує аерацію, але водночас може гальмувати деструкцію через руйнування міцелію грибів.

Спільне культивування різних мікроорганізмів часто забезпечує більш активну делігніфікацію лігноцелюлозних субстратів. *Змішані культури* можуть являти собою природні асоціації, що виявляють одночасно целюлолітичну і азотфіксуючу активність (приклад – асоціації азотфіксуючої бактерії *Clostridium butyricum* з грибами *Trichoderma harzianum* або *Penicillium corylophilum*, що здійснюють деструкцію соломи).

Для вдосконалення біологічного процесу делігніфікації та отримання паперу і очищеної целюлозовмісної сировини мікробіологічним методом велике значення має пошук мутантів або створення генетично модифікованих мікроорганізмів, що споживають виключно лігнін і позбавлені целюлолітичної активності.

2.9. Біодеградація синтетичних полімерних матеріалів та використання біодегратованих пластиків

Плаستيки відносяться до матеріалів, які у складі різних твердих відходів у великій кількості потрапляють до навколишнього середовища. Частка синтетичних полімерних матеріалів у загальній масі відходів в даний час становить близько 5–6 %. Легкість і міцність, висока здатність протистояти впливу зовнішніх факторів, довготривалість використання, нерозчинність у воді, нетоксичність – все це зумовило їх широке поширення. У той же час стійкість пластиків, що потрапили в відходи, вміст добавок, багато з яких дуже токсичні, обертаються серйозною екологічною проблемою.

У природному середовищі біодеструкції піддаються майже всі полімерні матеріали, але для більшості з них швидкість руйнування дуже низька. Вона залежить від *природи* полімеру, а також *виду пластифікатора та наповнювача*, які використовуються при виготовленні виробів. У природних умовах полімери, за структурою подібні до природних (похідні целюлози, хітину, модифікований крохмаль, полісахариди пулулан і курдлан, полілактид, полігідроксипутират, полігліколактид та ін.), відносно легко розкладаються і мінералізуються мікроорганізмами. Частина продуктів розкладання таких полімерів вступає в реакції гуміфікації, утворення пов'язаних залишків із ґрунтовою та іншою природною речовиною.

Безпосередньо полімерні смоли, що становлять основу пластику, мають різну біостійкість залежно від хімічної структури макромолекули, довжини

полімерного ланцюга, наявності та природи бічних розгалужень та груп, ступеня кристалічності полімеру. Їх біостійкість підвищується у міру зростання довжини ланцюга і розгалуженості макромолекул. Так, високомолекулярний поліетилен не піддається біодеструкції, а низькомолекулярний з молекулярною масою вище, ніж 25000 руйнується під впливом грибів. Ступінь розгалуженості впливає на стійкість більше, ніж молекулярна маса полімеру. За інших рівних умов *карбоцелні* полімери є менш біостійкими, ніж *гетероцелні, аліфатичні* швидше розкладаються, ніж *ароматичні, насичені* – чим *ненасичені, аморфні* – чим *кристалічні, гідрофільні* – чим *гідрофобні, низькоплавкі* – чим *високоплавкі, нерегулярні* – чим *регулярні*.

Другий важливий компонент пластиків, окрім полімерних смол – пластифікатори. Це менш стійкі компоненти. Як правило, пластифікаторами служать складні ефіри адипінової, аконітової, лауринової, олеїнової, себацінової, фталевої та інших органічних кислот, а також фосфорної кислоти, гліцерин, сорбіт. Вміст пластифікатора може становити 30–50 % від маси пластику, тому від біостійкості пластифікатора великою мірою залежить і біостійкість всього матеріалу. Пластифікатори, до складу яких входить *фосфорна* або *фталева* кислота, мають найбільшу стійкість до впливу мікроорганізмів. Найменша стійкість у ефірів *себацінової* та інших аліфатичних кислот.

Крім полімерних смол та пластифікаторів до складу пластиків входять наповнювачі, стабілізатори, барвники. *Наповнювачі* з природних матеріалів – папір, волокна, тканини, борошно дерево мікробіологічно нестійкі.

Швидкість біодеструкції полімерних матеріалів значною мірою залежить також від *просторової доступності* макромолекул біологічним агентам, що визначається гідрофільно-гідрофобними властивостями поверхні матеріалів, їх надмолекулярною організацією та макроструктурою, а також природою реагенту. Поперечні зв'язки між макромолекулами і короткі бокові ланцюжки можуть бути стеричною перешкодою для атакуючих їх молекул. Полімерні матеріали з просторово пошитою матрицею є найбільш стійкими. Набухання матеріалу, передобробка його з метою збільшення вільної поверхні, набухання і зменшення стеричних перешкод для дифузії ферментів і низькомолекулярних активних частинок в об'єм матриці полімеру підвищують його біодоступність.

Здатність полімерів до біодеструкції зазвичай визначають за стандартною методикою, в якій деструкція оцінюється зростанням мікроорганізмів за п'ятибальною шкалою (найбільш стійкі пластики – оцінка 0 балів, найменш стійкі – 4 бали).

Із загальної кількості 30–40 % всіх пластиків використовується для виготовлення пакувальних матеріалів, пляшок та інших жорстких контейнерів, а також як покриття та ізоляція. До пластиків, що випускаються у найбільшому обсязі, відносяться *поліетилен*, *полістирол*, *полівінілхлорид* та *поліпропілен*. Вони становлять приблизно 2/3 у загальній масі всіх пластиків і відносяться до найбільш біостійких. Особливо стійкий полістирол, час руйнування якого у ґрунті становить десятки років.

Інші групи пластиків – *поліаміди* (у тому числі нейлонові та капронові пластики), *поліакрилати*, *полікарбонати*, *поліформальдегідні смоли*, *феноласти* також досить стійкі до мікробіологічного впливу. Швидкість біодеструкції цих матеріалів можна порівняти зі швидкістю біологічного розпаду лігніну та гумінових речовин.

До відносно біодоступних відносяться *поліефіри* (поліетиленгліколь, поліпропіленгліколь, політетраметиленгліколь), *поліуретани* та *пластифікований полівінілхлорид* (ПВХ), *силікон*, *модифікований поліетилентерефталат* (ПЕТФ), *полібутіленсукцинат*, *полікапролактон*. Легко деградуються під дією ферментів *полігідроксиалканоати*, *полімери молочної та гліколевої кислот* (полілактиди та полігліколактиди), полімери, що містять аміногрупи, – *поліглутамат* та інші *поліамінокислоти*, *ацетат целюлози*, *карбоксиметилцелюлоза*, *полівініловий спирт*.

Біодеструкція виробів із синтетичних полімерів може бути викликана мікроорганізмами різних систематичних груп, що належать до грибів та бактерій. Однак найчастіше в руйнуванні пластиків беруть участь *змішані асоціації мікроорганізмів*, що характеризуються широкою різноманітністю.

Недосконалі мікроскопічні гриби (рр. *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Fusarium*) відносяться до найбільш активних руйнівників пластиків, що викликають різні пошкодження та їх деструкцію. Ці гриби використовують у стандартних тестах на біостійкість. Ушкодження пластиків відбуваються в результаті розростання грибів на поверхні матеріалу, проникнення міцелію в його товщу через мікротріщини, а також внаслідок агресивного впливу ферментів і метаболітів грибів (органічних кислот) на окремі компоненти пластиків.

Серед *гетеротрофних бактерій* найбільшу активність при біодеградації проявляють стрептоміцети, мікобактерії, нокардії, псевдомонади та бацили (особливо при деструкції поліамідів). Здатність всіх цих мікроорганізмів руйнувати полімерні матеріали пов'язують з великою різноманітністю ферментів і метаболітів, що секретуються ними в навколишнє середовище. В

результаті дії позаклітинних ферментів і метаболітів полімерний матеріал переводиться в розчинний стан, утворюються низькомолекулярні продукти розпаду, які доступні мікроорганізмам як джерела енергії і живлення. Біодеструкція полімерів може прискорюватися під впливом окислених форм іонів Fe і Mn і хемолітотрофних мікроорганізмів (залізоокислювальних, марганецьокисних бактерій), що генерують окислені форми іонів у присутності кисню.

Важливу роль у руйнуванні пластиків грає їх здатність адсорбувати мікробні клітини. Мікроорганізми прикріплюються до поверхні твердих субстратів в результаті дії фізико-хімічних сил (неспецифічна адгезія) та біологічних процесів (специфічна, «активна» адгезія). Як правило, чим вища здатність мікроорганізмів до адгезії, тим вища їхня деструктивна дія. Клітини, що прикріпилися, виділяють ферменти, що діють тільки в безпосередній близькості від клітинної оболонки, тому пошкодження пластиків в даному випадку відбувається при безпосередньому контакті мікроорганізмів з ними.

Руйнування матеріалів під дією ферментів настає внаслідок різних реакцій – окислення, відновлення, декарбоксілювання, етерифікації, гідролізу і т. п. Активну руйнівну дію надають ферменти – *гідролази* (*естерази*, *протеїнази*), *ліази* і особливо *оксидоредуктази*.

Біосинтез *естераз* властивий багатьом мікроорганізмам. Естерази каталізують гідролітичний розрив ефірних, складноефірних, кислотаногідридних зв'язків. З розриву ефірного зв'язку починається руйнування пластифікаторів. Вільна кислота, що утворюється, використовується багатьма мікроорганізмами як джерело вуглецю.

Біодеградація *поліоксибутирату* (ПОБ) починається з розриву ефірних зв'язків і утворення олігомерних фрагментів і розчинної молекули – гідроксималярної кислоти. Розчинні продукти розкладання адсорбуються через стінки клітин і метаболізуються. Це відрізняє ПОБ від багатьох біодеструктованих полімерів. Здатність до біодеградації та біосумісність є основною передумовою застосування даного полімеру в медицині як складової протезів, шовних ниток, носіїв лікарських препаратів, що пролонгують їх дію. Здатність розкладатися під дією естераз також мають сегментовані поліефіруретани. У той же час ці полімери є стійкими до дії колагеназ та оксидаз.

Хоча основна дія *протеїназ* – розщеплення білків за місцем пептидних зв'язків, проте деякі з них мають досить широку субстратну специфічність і здатні атакувати полімерні матеріали, що містять амідні та ефірні зв'язки:

сечовиноформальдегідні полімери, акриламід, поліамід та поліуретани (поролон). Серед секретованих ферментів цієї групи найбільш поширені протеази трьох класів – серинові, метало- та кислі протеази. Їхній оптимум рН лежить у лужному (рН 8,0–11,0), нейтральному (рН 6,0–7,8) або кислому (рН 2,5–3,5) середовищі відповідно. Тому біодеградація протеїназами сильно залежить від рН середовища та її компонентів (фосфатних, карбонатних, бікарбонатних іонів та ін.).

Ферменти класу *ліаз* каталізують негідролітичне розщеплення речовин з утворенням подвійного зв'язку (або приєднання груп за місцем подвійних зв'язків). При цьому можуть розриватися зв'язки С–С, С–О, С–N, С–Cl та відщеплюватись H_2O , CO_2 , NH_3 , HCl та інші невеликі молекули. Ферменти цього класу характеризуються високою специфічністю і вибірковістю по відношенню до субстрату. Вони відіграють певну роль, наприклад, у руйнуванні галоїдвмісних матеріалів.

З *оксидоредуктаз* особливу роль у руйнуванні пластиків грають *оксигенази*, *оксидази* та *пероксидази*. Вони діють на функціональні групи: $-C-C-$, $=CH-OH$, $=C=O$, $-CH=CH-$, $=CH-NH_2$, $-CH=N-$. Міцеліальні гриби, що руйнують пластики, виділяють у середу лакказу, тирозиназу, каталазу, пероксидази, активні кисневі радикали, тобто їхня дія на пластики багато в чому подібна до окисних ферментативних систем у целюлолітичних і лігнолітичних організмів. Аналогічна дія характерна для нейтрофілів і макрофагів при атаці на полімерні матеріали, імплантовані в організм тварин і людини.

Один із основних механізмів руйнівної дії на полімери низькомолекулярних метаболітів міцеліальних грибів та бактерій – *кислотний каталіз* різних реакцій *розщеплення* під дією органічних кислот.

Поліетилен і поліпропілен, полістирол, фенопласти та фуранові смоли найбільш стійкі до дії органічних кислот. Менш стійкі полівінілхлорид, поліметилакрилат та поліамідні смоли. Поліуретани не стійкі до щавлевої кислоти, а епоксидні смоли є нестійкими до молочної кислоти. Присутність у пластмасах органічних наповнювачів, які є, як правило, гарним поживним матеріалом для цвілевих грибів, сприяє активному утворенню ними органічних кислот і тим самим посилює руйнування пластиків. Водорозчинні аналоги матеріалу полімеру можуть прискорити його деструкцію, активуючи необхідні ферменти підготовчого метаболізму і розкладаючи стійкі макромолекули в режимі кометаболізму з більш доступними аналогами. Так, біодеструкція високостійкого катіонообмінника на основі просторово зшитого кополімеру стиролу і дивінілбензолу стає можливою лише в режимі кометаболізму при

споживанні водорозчинного матеріалу, отриманого шляхом обробки цього ж іоніту реактивом Фентона ($H_2O_2 + Fe_2^+$, рис. 2.24).

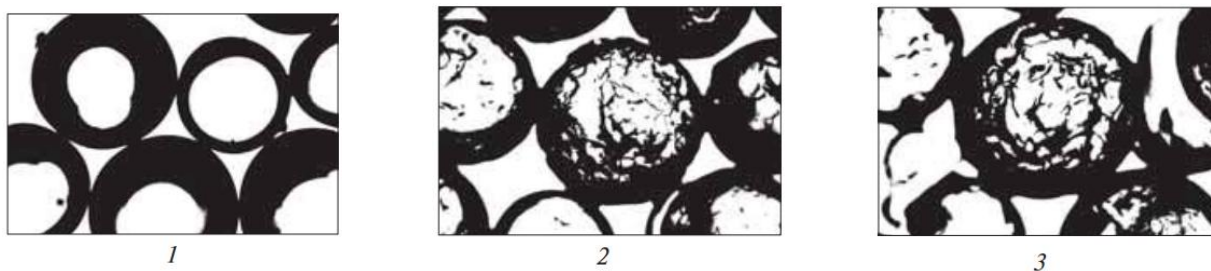


Рис. 2.24. Біодеструкція катіоніту КУ-2-8 у присутності додаткового субстрату (водорозчинної фракції катіоніту, отриманої після його обробки реактивом Фентона): 1 – деструкція через 3 місяці без внесення водорозчинної фракції катіоніту; 2 - деструкція через 3 місяці з внесенням водорозчинної фракції катіоніту і фенолоокислюючих мікроорганізмів; 3 – деструкція через 3 місяці із внесенням водорозчинної фракції катіоніту та грибів *Acremonium kiliense* (збільшення 50х)

Використання пластмас, здатних швидко розкладатися в природних умовах після певного терміну служби, – один із шляхів зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище. Полімери з регульованим терміном служби, як правило, відносяться до *фото-і* (або) *біоруйнівних*, які розкладаються в природних умовах під дією світла, тепла, повітря та мікроорганізмів, включаючись таким чином у біологічний цикл. Неферментативний гідроліз, окислювальна каталітична деструкція, фотохімічна деструкція, механодеструкція і механоактивація – всі ці процеси, відповідальні за небіологічні шляхи руйнування пластиків у природі, покращують біодоступність і біоруйнівність полімерного матеріалу. Швидкості абіотичних процесів, наприклад фотохімічної деструкції, що перетікає в природних умовах, часто лімітують сумарну швидкість розкладання пластику.

Полімер, як правило, вважається *легкорозкладним*, якщо вся його маса розкладається у ґрунті або воді за *6 місяців*. Такі матеріали все більш широко застосовуються в побутових цілях для виготовлення різних форм (бутлі, контейнери, коробки тощо), пакувальних ємностей та плівок разової дії, для виготовлення ниток, нетканих матеріалів, мішків, одноразових серветок та предметів особистої гігієни; у сільському господарстві: у вигляді плівок для мульчування, упаковки для добрив та насіннєвого матеріалу, для щеплень у садівництві, інкапсулювання насіння з метою скорочення термінів дозрівання та підвищення врожайності сільськогосподарських культур, як захисне

покриття коренів при посадці дерев, для виготовлення сінов'язального шпагату, здатного швидко розкладатися у шлунково-кишковому тракті ссавців. Застосування полімерів, що легко розкладаються, можливе для виготовлення геотекстильних матеріалів, зміцнення біоматів, що використовуються для захисту ґрунту від поверхневої ерозії та відновлення трав'яного покриву.

Створення з полімерів з регульованим терміном служби іригаційних установок, теплиць дозволяє економити трудові витрати, необхідні для їх демонтажу та утилізації. Біодоступні полімери можуть використовуватися для нанесення кольорових покриттів та малюнків на поверхні алюмінієвих банок. Такі покриття можуть відносно швидко (не більше 30–60 хв) розкладатися мікроорганізмами у спеціально створених умовах під час обробки банок, які надходять на переплавку.

Біорозкладні матеріали також знайшли застосування в медицині. Світова потреба в легкорозкладних пластмасах оцінюється в кілька млрд дол. на рік. На їх основі в даний час випускається близько 1 млн т різних матеріалів і виробів, що становить трохи менше 1 % на ринку полімерів. Найбільш швидко зростаючою областю використання легкорозкладних пластиків є виробництво гнучкої упаковки.

У табл. 2.7 наведені деякі з варіантів композицій легкобіорозкладних полімерів.

Таблиця 2.7. Приклади композицій біорозкладних полімерів

Біорозкладні компоненти (БК)	Полімер, склад композиції
Мікроорганізми (дріжджі, бактерії), білки яких мають підвищену стійкість до дії кислих і лужних середовищ	Поліолефіни, полістирол, полівінілхлорид, БК: 50 % (за масою)
Порошкоподібна органічна речовина з групи: крохмаль, маніт, лактоза, карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), казеїн	Термопластичні полімерні композиції, БК: 1–10 % (за масою)
Карбоксиметилцелюлоза та неорганічний наповнювач (кізельгур, CaCO ₃ , безводний CaSO ₄ , CaSO ₃)	Поліолефіни, суміші поліолефінів з полівінілхлоридом, КМЦ 1–10 %, неорганічний наповнювач 40–90 %
Діалканоїльний полімер зі структурною одиницею [–O–R, –O–CO–R–CO–]	Наповнювач або суміші 5–90 %; природний полімер 0–90 %; БК > 10 %
Термопластичний оксидалканоїльний полімер, що містить > 10 % ланок формули [–O–(CH ₂) _n –CO–], де n = 2–7, причому n ≠ 3	Пластифікатори або наповнювачі 0–75 %, природний продукт, що біодеградується 3–97 %; БК: 3–97 %
Суміш n-алканоїламінофенолів	Полімери α-олефінів

Широке практичне застосування полімерів, що швидко розкладаються, можливо, якщо вони будуть задовольняти ряду вимог:

– в результаті модифікації полімеру не мають суттєво змінюватись його

експлуатаційні характеристики;

– добавки, що вводяться в полімер, не мають бути токсичними, оскільки полімери призначені в першу чергу для виготовлення тари та упаковки;

– полімери мають оброблятися звичайними методами, не піддаючись при цьому розкладу;

– необхідно, щоб вироби, отримані з таких полімерів, могли зберігатися і експлуатуватися тривалий час в умовах відсутності прямого проникнення УФ-променів;

– час до руйнування полімеру має бути відомий і змінюватись в широких межах;

– продукти розкладання полімерів не мають бути токсичними.

Принципово можливі три шляхи створення біорозкладних полімерних матеріалів:

1) створення біоруйнівних пластиків на основі полімерів, синтезованих та асимільованих мікроорганізмами;

2) введення в полімер добавок, що асимілюються мікроорганізмами;

3) введення в полімер добавок, що ініціюють абіотичні, перш за все фотохімічні процеси деструкції; продукти яких стають легкодоступними для подальшого біологічного розкладання.

До *першої групи* пластиків відносяться полі(гідр)оксиалканоати (ПГА) (рис. 2.25), зокрема полі(гідр)оксибутират (ПОБ), полі(гідр)оксивалеріат (ПОВ), полі(гідр)оксигексаноат (ПГГ) та їх кополімери, синтезовані деякими мікроорганізмами як речовини для запасання енергії, а також полілактиду.

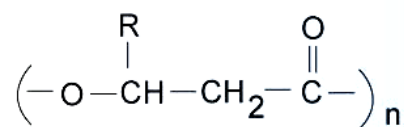


Рис. 2.25. Структурна формула полі(гідр)оксиалканоатів

За хімічною структурою ПОБ і ПОВ – полієфіри з ланками, що повторюються, 3-гідроксималярної кислоти (і/або 4-гідроксималярної) і 3-гідроксивалеріанової кислоти відповідно, в яких гідроксильними і карбоксильними групами окремі мономерні пов'язані в ланцюгу між собою складним ефірним зв'язком. ПОБ та ПОВ хімічно не реакційноздатні, але мінералізуються ґрунтовою мікрофлорою.

У цитоплазмі бактерій полігідроксиалканоати утворюють внутрішньоклітинні включення (гранули діаметром 0,3-1,0 мкм) і

накопичуються в кількостях 30–80 % від клітинної маси. Умови синтезу та вид мікроорганізма-продуцента впливають на основні властивості одержуваних ПОБ та ПОВ.

Для промислового отримання ПГА активно вивчають і використовують бактерії *Ralstonia eutropha* (стара назва *Alcaligenes eutrophus*), *Alcaligenes latus*, *Azotobacter vinelandii*, *Bacillus megaterium*, *Methylomonas*, *Methylocystis*, *Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas oleovorans*. Бактерії *Ralstonia eutropha*, *Azotobacter vinelandii*, *Pseudomonas oleovorans* синтезують полімери при надлишку джерела енергії та вуглецю в середовищі та дефіциті біогенних елементів: азоту, сірки, фосфору, калію, магнію або кисню. *Alcaligenes latus* і рекомбінантні мікроорганізми ефективно синтезують ПГА при високих швидкостях зростання і без обмеження зростання будь-яким лімітуючим фактором.

Поряд із мікроорганізмами для отримання полігідроксиалканоатів можна використовувати генетично модифіковані рослини та хімічний синтез.

Сировиною для отримання ПГА можуть бути різні субстрати: CO₂ в суміші з H₂ (при синтезі за допомогою бактерій *Ralstonia eutropha*), метан, вуглеводні, метанол та інші спирти, органічні кислоти, відходи спиртової промисловості, цукровмісні відходи ряду виробництв (м'яса, тростниковий цукор та ін), відходи гідролісної промисловості та інших виробництв з переробки деревини, рослинних біомас, бурого вугілля і навіть такі токсичні субстрати, як бензоат натрію і фенол.

За допомогою *Alcaligenes latus* за 18 годин ферментації в середовищі можна накопичити ПГА 68 г/л з виходом близько 50 % сухої маси вихідного субстрату. Метилотрофні бактерії з сериновим шляхом асиміляції метанолу здатні накопичувати до 60 % ПОБ в клітинах при врожаї біомаси до 40 г/л по сухій масі. Деякі штами *Azotobacter* продукують понад 80 % ПГА від сухої маси клітин.

Виділення та очищення біополімеру можуть проводитися з виходом до 80 % з використанням методів, що практично дозволяють зберегти незмінним біополімер, або методами, що призводять до часткової деградації ПГА, що супроводжується зниженням їхньої середньої молекулярної маси. Найчастіше ПГА з біомаси екстрагують хлороформом, гексаном, гіпохлоритом натрію та його сумішами з хлороформом.

Спрямованим підбором продуцента, регулюванням параметрів процесу виділення полімеру, варіюванням співвідношення мономерних ланок або використовуючи сополімери полігідроксиалканоатів (наприклад, 3-

гідроксибутират і 4-гідроксибутират, 3-гідроксибутират і 3-гідроксивалеріат) можна отримати полімер з необхідним комплексом властивостей.

До найбільш важливих *комерційних властивостей* ПГА належать їх температура плавлення й молекулярна маса. Температура плавлення ПГА мало залежить від умов одержання та для різних зразків лежить у діапазоні 179–191 °С. При зростанні масової частки валеріату в гетерополімері до 30–40 % $T_{пл}$ знижується до 155–160 °С. Термопластичність полігідроксиалканоатів дозволяє виготовляти з них плівки та інші вироби методами термопресування, екструзії, ливарного та видувного формування.

Молекулярна маса синтезованих ПГА залежить від штаму-продуцента, умов ферментації та виділення, а також хімічного складу полімерів та визначає здатність подовження полімеру при розриві. Молекулярні маси однієї лінії продуктів з ПГА (*Metabolix*) знаходяться в діапазоні від тис. до млн, а їх подовження при розриві – в діапазоні від 5 % до 1000 %. Бактерії р. *Azotobacter* залежно від умов можуть утворювати лінійні полімери ПГА з молекулярною масою до декількох млн. Молекулярна маса полімеру, ізольованого з бактерії *Bacillus megaterium*, – 105–106.

Можливість отримання ПГА з різною молекулярною масою – від кількох тисяч до кількох мільйонів дальтонів, визначає різноманітність їх *властивостей* та *сфер застосування*. Вони термостабільні, нерозчинні у воді, досить стійкі до впливу кислот та УФ-випромінювання, проте піддаються біологічному розкладанню в морській воді, ґрунті, у середовищах компостування та переробки відходів. Вироби з ПГА можна отримувати з розплаву, з розчину, зміцнювати наповнювачами, скручувати в нитки. На основі ПОБ та інших ПГА можна виготовляти плівки з газобар'єрними властивостями, для обволікання фруктів і насіння, водовідштовхувальні покриття для паперу та картону, матеріали одноразового використання для пакування, предметів особистої гі-гієни, пролонгованого вивільнення добрив та агрохімікатів, для використання в медичних цілях у вигляді біорозкладних та біосумісних хірургічних ниток, пластин, плівок для покриття ран, матриць для ліків пролонгованої дії.

Першою корпорацією, що розпочала освоєння промислового виробництва полігідроксиалканоатів, була фірма *ICI* у Великій Британії. З 1992 р. фірми *Zeneka Seeds* та *Zeneka Bio Product* (Великобританія) розпочали випуск ПОБ та співполімерів 3-гідроксибутирату з 3-гідроксивалеріату під торговою маркою «Біопол» (*BIOPOLTM*). Для отримання полімеру було взято мутантний штам водневих бактерій *R. eutropha*, здатний засвоювати глюкозу з виходом полімеру

близько 33 % від субстрату. Цей матеріал використовується для упаковок одноразового застосування; легко розкладається мікроорганізмами в анаеробних та аеробних умовах. Час розкладання становить від 6 до 36 тижнів. В даний час полімери на основі ПГА випускаються фірмами *Berlin Packaging Corp.*, *Metabolox Inc.*, *Monsanto* (США), *Bioscience Ltd.* (Фінляндія), *Bio Ventures Liberta Inc.* (Канада), *Zeneka Seeds* (Великобританія) та ін.

Інший біорозкладний полімер *полілактид* (полілактат, поліоксипропіонова кислота) за хімічною структурою представляє лінійний полієфір молочної кислоти (рис. 2.26).

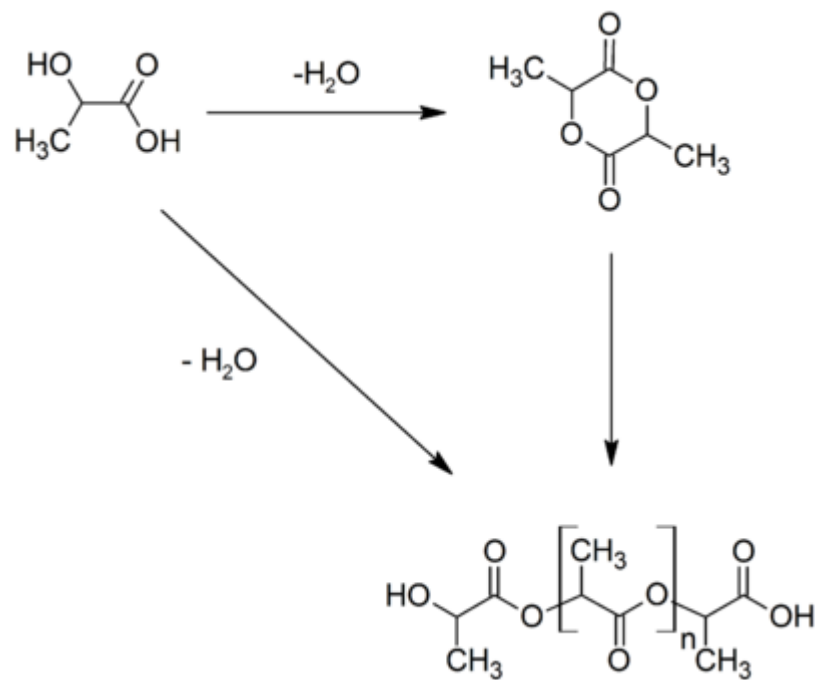


Рис. 2.26. Механізм синтезу полілактиду

В результаті реакції поліконденсації L-молочної кислоти, що утворюється при ферментації цукрів (у процесі молочнокислого бродіння), зазвичай виходять низькомолекулярні полімери, які можуть бути перетворені на високомолекулярні полімери за рахунок введення агентів, що забезпечують з'єднання ланцюжків.

Полімолочна кислота виходить за рахунок початкового отримання лактидного мономера. Згодом отриманий лактид входить у реакцію полімеризації з розкриттям циклу, яка зазвичай проводиться у присутності алкоксидів металів як каталізаторів. Внаслідок такого процесу виходить високомолекулярний складний полієфір – полімолочна кислота (полілактид).

Полилактид має яскравий блиск і прозорість, у присутності вологи здатний розкладатися як на повітрі, так і в анаеробних умовах. Його

розкладають як мікроорганізми, так і комахи. Він використовується в матеріалах жорсткої упаковки та у вигляді плівок для харчових продуктів, квітів, виготовлення пляшок для води, соків, молочних продуктів. Комерційні полімерні матеріали та вироби на основі молочної кислоти під торговою маркою *Novon* випускаються фірмою *Wamer-Lambert&Co* (США).

Матеріали, аналогічні полілактиду, випускають на основі *поліглюконату* або сополімерів поліглюконату та полілактату. Зміцнений матеріал *Neovail* на основі поліглюконату застосовують для з'єднання кісток і для отримання текстилю, що розкладається в морській воді та ґрунті.

Вартість Біопола, Новона та аналогічних пластиків ще дуже висока (близько 40–50 дол. за кг) порівняно із синтетичними пластиками (близько 1 дол. за кг). Передбачається, що розширення виробництва біопластмас, використання більш дешевої сировини та ефективних мікроорганізмів продуктів призведе до зниження ціни до 3-10 дол. за кг.

До біодегратованих відносяться й матеріали, які можуть бути отримані модифікацією природних полісахаридів, інших полімерів, синтетичних пластиків. Такі матеріали за показниками міцності наближаються до пластмас. До них, наприклад, відносяться *ацетатцелюлоза* і *модифікований крохмаль*. На основі ацетатцелюлози з різними добавками та пластифікаторами створено матеріал *Biocell* (Франція). Він має високі міцнісні характеристиками, а також високу прозорість. Після занурення у воду упаковка з такого матеріалу набухає і вже через 6 місяців до 40 % матеріалу мінералізується. У ґрунті повне розкладання матеріалу здійснюється протягом 18 місяців.

Крохмаль може бути використаний як біорозкладний матеріал, якщо його належним чином модифікувати за допомогою хімічної обробки, при якій частина гідроксильних груп замінюється іншими, такими як ефірні або складноефірні, та створюються додаткові зв'язки між різними частинами молекул крохмалю. Це збільшує його теплостійкість, стійкість до впливу кислот і зусилля на зріз. Модифікований крохмаль розкладається в навколишньому середовищі, але має властивості комерційно корисного антистатичного пластику. Його можна робити на тому ж обладнанні, що і звичайні пластики, можна фарбувати та наносити на нього друк з використанням усіх звичайних технологій. З нього виготовляють піддони для харчових продуктів, плівки для сільського господарства, пакувальні матеріали, столові прилади, сітки для овочів та фруктів.

Практичне застосування знайшли *кополімери крохмалю та метилакрилату, крохмалю та вінільних мономерів, лігніну та хімічних мономерів,*

кополімери на основі сахарози, деякі з яких використовуються в сільському господарстві для мульчування ґрунту, для отримання одноразових серветок, гігієнічних пакетів, для упаковки як добавка до інших комерційних матеріалів. Швидкість біодеструкції цих матеріалів регулюють шляхом зміни співвідношення крохмалю і кополімерів, введення певної кількості фунгіцидів, таких як параформальдегід. Залежно від рецептури час їхнього розпаду становить від двох тижнів до чотирьох місяців.

Другий спосіб створення полімерів, що розкладаються під впливом мікроорганізмів, полягає в додатку в полімерну матрицю речовин, які самі легко руйнуються і засвоюються мікроорганізмами. Для цих цілей часто застосовують різні *полісахариди*, вміст яких може досягати 60%. В якості таких добавок можуть використовуватися *карбоксиметилцелюлоза*, різні види *крохмалю* (рисовий, картопляний, кукурудзяний, пшеничний та ін), *маніт*, *казеїн*, *дріжджі*, *сечовина*, *соєвий білок* та багато інших сполук природного походження. Крохмаль знижує вартість пластмаси та до того ж відповідає екологічним вимогам.

Для того, щоб зробити *сумісними* синтетичний полімер і полісахарид, наприклад поліетилен і кукурудзяний крохмаль, останній обробляється силансв'язуючим агентом. Також додається невелика кількість ненасиченого ефіру, такого як кукурудзяна олія, яка служить прооксидантом, тобто агентом, що стимулює розвиток окисних процесів. Після споживання крохмалю мікроорганізмами полімерна матриця залишається як пориста структура. Прооксидант реагує із солями металів у ґрунті (або доданих у пластик) з утворенням пероксидів. Це фактично і призводить до руйнування полімерних ланцюгів на фрагменти, досить малі і засвоювані мікроорганізмами. Швидкість дегградації збільшується завдяки збільшенню поверхні матриці при споживанні гранул крохмалю. Вона залежить від типу полімеру, температури, вологості, типу мікроорганізмів, присутності солей металів, питомої поверхні і товщини матеріалу. Результати тестів і комп'ютерне моделювання показали, що найкращі умови для біодегградації створюються, коли частка крохмалю перевищує 40 %. У цьому випадку більшість частинок крохмалю стикаються одна з одною, проникаючи через всю полімерну матрицю. На практиці, однак, використовують менші добавки крохмалю через суттєве погіршення властивостей міцності пластику. Полісахаридні добавки вводяться разом з речовинами, що збільшують адгезію між гранулами полісахариду та полімеру безпосередньо в процесі екструзії. Матеріали на основі поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду з добавками 10–40 % крохмалю випускаються

під торговими назвами *Bioplastic* (Великобританія).

До біорозкладних синтетичних пластиків відносяться модифікований поліетилентерефталат, аліфатичні поліефіри, аліфатичні ароматичні сополіефіри. Для надання здатності ПЕТФ до біорозкладання перед полімеризацією до терефталату додають комомери, чутливі до гідролізу: полібутиленадипат або політетраметиленадипат. Прикладами біорозкладних синтетичних аліфатичних поліефірів є полібутиленсукцинат, що має властивості, подібні до ПЕТФ, і полікапролактон. Для зниження вартості вони можуть кополімеризуватися з крохмалем або іншими мономерами. Приклад біорозкладних аліфатично-ароматичних кополіефірів: полімер, що отримується в результаті співполімеризації терефталевої кислоти, адипінової кислоти і бутандіолу. Деякі марки цих матеріалів розкладаються при компостуванні за кілька тижнів.

Регулюючи типи комомерів та співвідношення реагентів, можна отримати полімери з необхідними фізичними властивостями та швидкістю деградації виробів та матеріалів на їх основі.

Перелік біорозкладних пластиків на основі модифікованих природних, штучних або синтезованих мікроорганізмами та рослинами полімерів постійно розширюється.

До *третьої* групи полімерних матеріалів відносяться фоторозкладні пластмаси. З точки зору фотохімії руйнування полімерів можливе, коли енергія збудження перевищує енергію дисоціації основного для більшості полімерів зв'язку С–С, і становить не менше 350 кДж/моль. Така енергія має кванти світла, починаючи з ближнього УФ-діапазону, що досягають поверхні Землі. Однак, щоб полімер міг піддаватися фотодеструкції, треба надати йому здатність поглинати світло з довжиною хвилі 300–400 нм і, крім того, поглинена енергія має передаватися іншим молекулам таким чином, щоб вони зазнали хімічних перетворень, в результаті яких відбувається деструкція.

Для надання здатності руйнуватися під дією світла на стадіях синтезу або переробки полімеру використовують спеціальні добавки або вводять до його складу світлочутливі групи, що поглинають УФ-випромінювання. Такі матеріали стабільні всередині приміщення (віконне скло абсорбує УФ-випромінювання) та в 10 разів чутливіше до сонячного світла на відкритому повітрі. Фоторуйновані матеріали після експозиції в атмосферних умовах настільки сильно деструктують, що можуть легко засвоюватися, наприклад, ґрунтовими мікроорганізмами навіть в умовах відсутності світла. З цієї причини фоторуйнівні полімери також називають біоруйнівними.

Проблема створення фоторозкладних пластиків полягає у використанні таких *активаторів руйнування* (фотосенсибілізаторів), щоб вони забезпечували певний термін служби пластмасових виробів без зміни їх властивостей, за відсутності токсичності, і не збільшували істотно вартість пластмаси.

Введення активаторів фотодеструкції можливе шляхом:

- *кополімеризації* мономерів із сполуками, що містять хромофорні групи або групи зі слабкими зв'язками (кетонними, альдегідними);
- *змішуванням* готових полімерів з фотосенсибілізаторами;
- *нанесенням* фотоактивуючих добавок на поверхню виробів.

Перевага першого методу полягає у відсутності дифузії низькомолекулярних сенсибілізаторів з полімерів, що важливо при виготовленні упаковки для харчових продуктів.

За *механізмом дії* сенсибілізатори фотодеструкції поділяють такі групи:

- сенсибілізатори триплетного стану;
- сполуки, що збуджують кисень під дією світла;
- радикалутворюючі агенти;
- сполуки, що легко піддаються фотостарінню;
- сполуки, що розкладаються за нерадикальним механізмом;
- каталізатори окислення.

Фотосенсибілізатори триплетного стану являють собою сполуки, що містять карбонільні (кетонні) групи, такі як бензофенон, ацетофенон, антрахінон, 1,4-діізопропілбензол, нафталін, антрацен, пірен, флуорен тощо, які мають високу енергію триплетного стану. Під впливом світлового опромінення сенсибілізатор збуджується та відриває атом водню від молекули полімеру, утворюючи полімерний радикал. Останній окислюється киснем повітря. Гідропероксид, що утворився в результаті, розкладається з розривом основного ланцюга і виділенням води. Молекулярна маса полімеру при цьому знижується.

До сполук, що *збуджують кисень під дією світла*, відносяться майже всі барвники, за винятком анілінових, сполуки аліфатичного ряду, сполуки з ядрами, що конденсуються. Сенсибілізатор, поглинаючи світло, збуджується до триплетного стану, і в результаті передачі енергії до молекул кисню утворюється синглетний кисень, який окислює полімер.

Радикалутворюючі агенти розкладаються під дією світла з утворенням активних радикалів, які прискорюють деструкцію полімерів. Як такі агенти можуть застосовуватися пероксиди, азоізобутіронітрил, карбонільні галогеновмісні сполуки.

До сполук, що *легко піддаються фотостарінню*, відносять речовини, що

містять ненасичені зв'язки типу $-\text{CH}=\text{CH}-$, наприклад каучуки, а також полімери з активною метиленою групою (поліпропілен, полібутен-1), що руйнуються завдяки утворенню пероксидних груп під дією світла і кисню. Такі фотодеструктивні полімери можна одержати на основі сумішей поліолефінів, взятих у певному співвідношенні. Наприклад, додавання до поліетилену або поліпропілену їх низькомолекулярних олігомерів (M 1000-5000) або 0,1–4,5 % полімеру стиролу, а також його похідних або кополімерів стиролу з етиленом і бутадієном, дозволяє отримати фотодеструктований матеріал.

За *нерадикальним механізмом* розкладаються кополімери етилену і стиролу з мономерами, що містять fotocутливі карбонільні групи (альдегідну, алкіл-і арилвінілкетонну).

Каталізаторами окислення є сполуки змінної валентності (Co, Cu, Fe та ін.), неорганічні солі, металорганічні та комплексні сполуки, наприклад, оксиди Mg, Pb, Al, Sb, Bi, карбонати Fe, нафтенати Co, фероцен, стеарати, ацетати, бензоати та ін. Хоча вони не мають у своєму складі фотоактивних груп, але мають фотоактивовану дію. Метали зі змінною валентністю (Co, Mn, Cu, Fe) особливо легко прискорюють фотостаріння полімерів і широко використовуються як каталізатори фотодеструкції.

Часто каталізатори окислення застосовують разом з фотосенсибілізаторами інших груп. Введення таких систем дає синергічний ефект і прискорює деструкцію полімерів. Як активатори фотодеструкції можуть також використовуватися карбонат кальцію і тальк.

На основі фоторозкладних пластиків в даний час випускаються матеріали для пакування харчових і фармацевтичних товарів, мульчування ґрунту (полімер «*Polutrol*», фірма *D. W. Young and Associates*, США; пластмаса «*Eslon*», фірма Секісуй Кагаку Коге К. К., Японія; плівка «*Sunflack*», фірма Ніссон Кагаку Коге К. К., Японія), господарські сумки, мішки для добрив та інші пакувальні матеріали («*Ecolyte D*» та «*Ecolyte S*», фірми *Van Leer*, Нідерланди та *Eco Plastics Ltd.*, Канада), пляшки для пакування косметичних товарів (фірма Сісейто, Японія). Розробкою та випуском таких матеріалів займається досить велика кількість фірм (*Biodegradable Plastics Inc.*, США; *Scasar*, Франція; *Alkerlund and Rausing*, Швеція; *Mitsui Toatsu Chemical Co.*, Японія та ін.). Термін життя фоторозкладаються матеріалів при дії сонячного світла на відкритому повітрі становить від 2–3 тижнів до 1 року.

Загалом біоруйнувані та фоторуйнівні полімерні матеріали не отримали поки що досить широкого застосування. Це пояснюється кількома *причинами*.

Для того щоб бути конкурентоспроможним на ринку пакувальних

матеріалів, біодеградований матеріал повинен мати *невисоку вартість* і *бути технологічним при обробці*. Внаслідок цих обмежень багато з біодеградованих матеріалів випускаються тільки в малих обсягах як спеціальні продукти, такі як хірургічні нитки, що розсмоктуються, або захисні покриття коренів при посадці дерев. Винятком є пластики з добавками крохмалю. Кукурудзяний крохмаль конкурентний за ціною з пластиками, з якими він змішується, і крохмальовмісні композити можуть бути перероблені на тому ж обладнанні, на якому переробляються і традиційні пластики.

Іншою проблемою може бути *відсутність умов для перетікання ефективної деградації*. Наприклад, фоторозкладні пластики можуть перебувати на звалищах укритими та екранованими від сонячного світла. У воді такі матеріали повільніше деградуватимуться, ніж на поверхні ґрунту.

При розкладанні полімеру відбувається безповоротна втрата цінних сировинних ресурсів, які за наявності відповідних технологій могли б бути реутилізовані. Такі матеріали менше підходять для рециклізації через домішки, які вони містять. Рецикловані продукти, що містять повторно використовувані сенсibilізатори фотодеградації, можуть втрачати свою стійкість після тривалої експозиції на світлі. Для нейтралізації дії фотосенсibilізаторів та збільшення часу життя в рециркулюючі пластики доводиться вводити *антиоксиданти* та *стабілізатори*.

Крахмалевмісні добавки можуть посилити горючість пластику і викликають надмірне піноутворення і злипання при його обробці з метою повторного використання.

Проте удосконалення технології біосинтезу, виділення, полімеризації та змішування призводить до поступового зниження вартості біорозкладних і фоторозкладних полімерів, підвищення їх міцності та зносостійкості та розширення масштабів виробництва. Цьому сприяє пріоритетність вирішення екологічних проблем та природоохоронна політика у різних країнах.

2.10. Складування та поховання твердих відходів

Більшість твердих відходів не утилізується, а складається або зберігається. Нетоксичні промислові та тверді побутові відходи вивозять на майданчики чи полігони поховання. Токсичні тверді промислові відходи герметизують, поміщаючи їх у металеві контейнери, цементні, засклені або залиті бітумною мастикою блоки, і захоронюють у глибоких котлованах, сховищах, могильниках в товщі глини або іншої водо- або газонепроникної

породи.

У найбільших масштабах складають та захоронюють тверді побутові відходи (ТПВ) на полігонах ТПВ. Площа, займана полігонами ТПВ, може становити десятки гектарів, а кількості відходів, що зберігаються на них, – мільйони тонн. Висота насипу побутових відходів, що зберігаються, на полігонах досягає 15–20 м і більше.

Полігон ТПВ є дуже складною антропогенно-геологічною системою, що функціонує тривалий час і впливає на навколишнє природне середовище протягом десятиріч. У внутрішньому середовищі в такій системі перетікають фізико-хімічні, хімічні, біохімічні та мікробіологічні процеси, що супроводжуються деградацією складних органічних сполук відходів, емісією в атмосферу речовин, що мають неприємний запах, утворенням фільтраційних вод та біогазу. Вони забруднюють приземне повітря, ґрунтові води та ґрунти, створюють пожежо- та вибухонебезпечні умови. Зменшення обсягу відходів в результаті їх розкладання, виділення газів призводять до просідання ґрунту.

Різні стадії біодеструкції ТПВ супроводжуються послідовною зміною мікробіологічних процесів, а також якісними та кількісними змінами фільтраційних вод та біогазу (рис. 2.27).

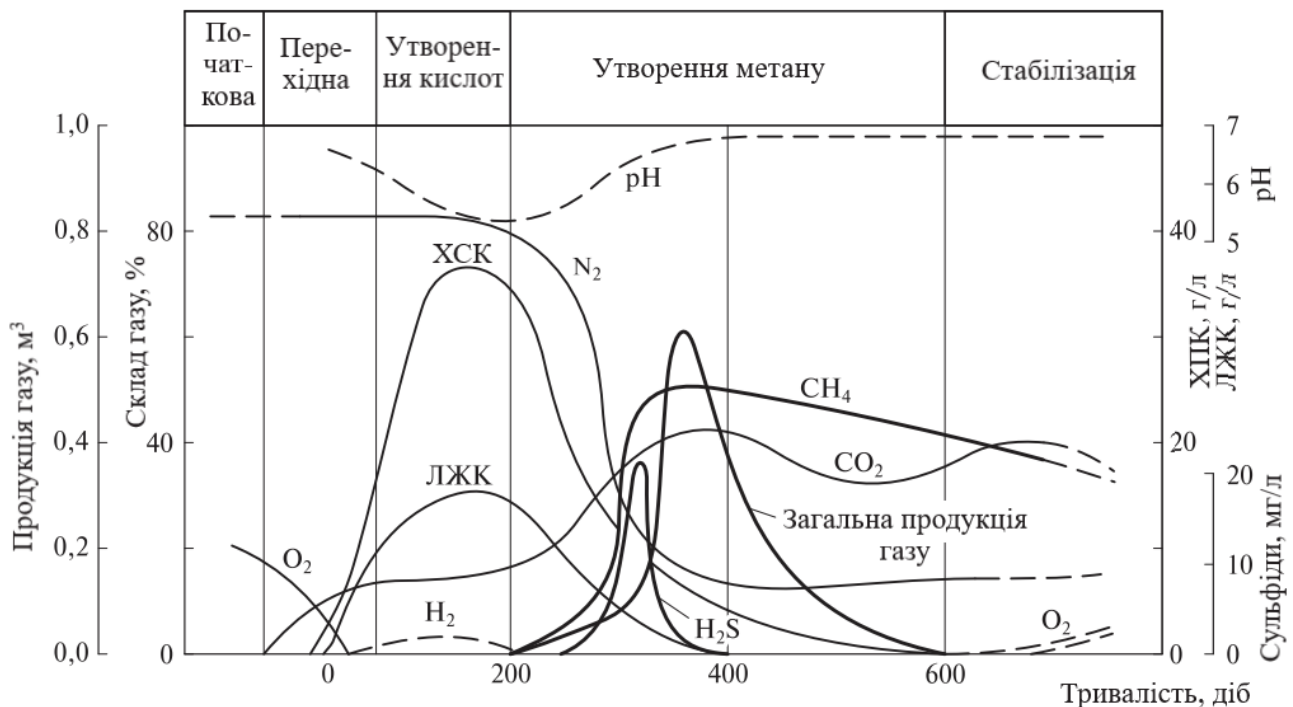


Рис. 2.27. Фази процесів, що відбуваються у звалищному тілі: ЛЖК – леткі жирні кислоти; ХСК – хімічне споживання кисню; склад газу вказаний в об'ємних відсотках

Серед мікроорганізмів у звалищному тілі спочатку розвивається аеробна мікрофлора, яка в умовах утрудненого надходження повітря споживає кисень повітря, що знаходиться між частинками сміття, редокс-потенціал середовища поступово зменшується. Після поглинання кисню діють анаероби, що не утворюють метан, розвиваються нітратредукція і сульфатредукція, створюються умови для осадження сполук металів, присутніх в середовищі. На завершальній стадії розвиваються метаногени. Залежно від місцевих умов через кілька місяців або років у товщі звалища настає стабільне метанове бродіння, яке може тривати 20–30 років після закриття полігону ТПВ. Температура в анаеробній зоні великих полігонів ТПВ коливається від 25 до 35 °С, досягаючи іноді на приповерхневих ділянках 50–55 °С (за рахунок тепла, що виділяється при окисненні метану аеробною мікрофлорою). Швидкість виділення метану досягає $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. У газі міститься 50–55 % CH_4 , близько 40 % CO_2 і 5 % N_2 . Вихід метану з відходів коливається від 0,0003 до 0,0700 м^3 на 1 кг сухої відходів. За 10 років з 1 т відходів на полігоні може виділитися в атмосферу до 15–20 м^3 метану.

Метан, утворений в товщі похованих відходів, може поширюватися в землі горизонтально і вгору, викликаючи ерозію покриваючого ґрунту і пригнічення рослин, що покривають полігон, оголення відходів на поверхні. При цьому частина метану, що просочується у верхні горизонти звалищних відкладень, може окислюватися аеробною мікрофлорою у верхньому шарі ґрунту, що аерується. Потужність аеробної зони залежить від глибини проникнення кисню повітря в звалищний ґрунт (зазвичай вона не більше 1 м). Потужні потоки біогазу, що утворилися в анаеробній зоні, можуть перешкоджати дифузії кисню.

Якщо з полігону просочуються забруднені дренажні води, то в міру біодеградації органічної речовини в дренажних водах нижче поверхні можуть формуватися *редокс-зони* в послідовності, що відповідає зменшенню редокс-потенціалу (рис. 2.28) з різним вмістом розчинних речовин, що характеризують окисно-відновні умови середовища у кожній із зон. У необлаштованих полігонах рівень органічних забруднень у воді, що просочується, може досягати 30–40 тис. мг/л по ХСК.

Частка органічних речовин у масі ТПВ, що надходять на полігон, у середньому становить 30–35 %. У біогаз трансформується 15–17 % маси ТПВ, у ґрунтові води надходить 10–12 %.

Сучасне облаштування полігонів має передбачати їх обладнання відповідно до екологічних та санітарно-гігієнічних вимог (рис. 2.29).

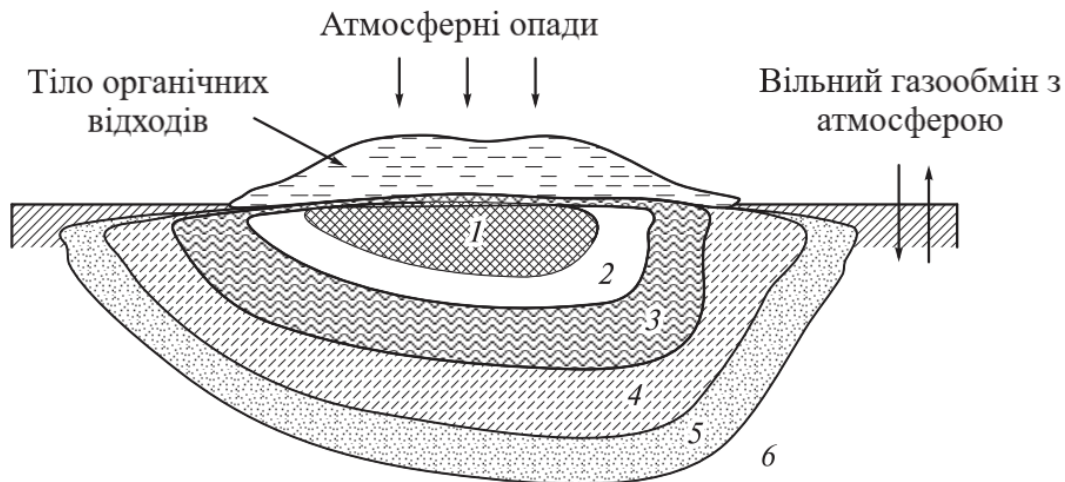


Рис. 2.28. Редокс-зони у процесі біодеструкції органічного субстрату: 1 – метаногенна (утворення метану при відновленні CO_2); 2 – сульфідогенна (сульфатредукція); 3 – ферогенна (відновлення Fe (III)); 4 – манганогенна (відновлення Mn (IV)); 5 – нітратредукуюча; 6 – аеробна

Враховують особливості місцевості, її рельєф, особливості геологічної будови підстилаючих порід, передбачуваного місця складування та зберігання ТПВ, переважну троянду вітрів, особливості навколишнього природного ландшафту, відсутність умов для утворення зсувів. Для зменшення емісії газів, що просочуються, і дренажних вод полігони ТПВ розташовують на піднесених місцях, що не затоплюються паводковими водами, з глибоким заляганням ґрунтових вод, вдалині від джерел водопостачання. Ґрунт, знятий під час підготовки майданчика, складують. Згодом він використовується для засипання відходів. Ґрунт дна ущільнюють, покривають водонепроникним шаром глини товщиною кілька метрів, поліетиленовою плівкою, геосинтетичною мембраною, що забезпечують зниження до мінімуму інфільтраційне надходження вилуговуваних забруднень у ґрунтові води. Останнім часом для цих цілей застосовуються спеціальні матеріали, які при взаємодії з водою набухають, утворюючи в'язкий, глиноподібний матеріал. По периметру котловану полігону ТПВ за технологією «стіна в ґрунті» може споруджуватися глиноцементна стіна, що захищає, глибиною до 10–15 м, що запобігає фільтрації забруднених вод у підземні горизонти. Для відведення фільтраційних вод необхідні дренажний шар та водовідвідні фільтруючі колектори та канали, система збору біогазу.

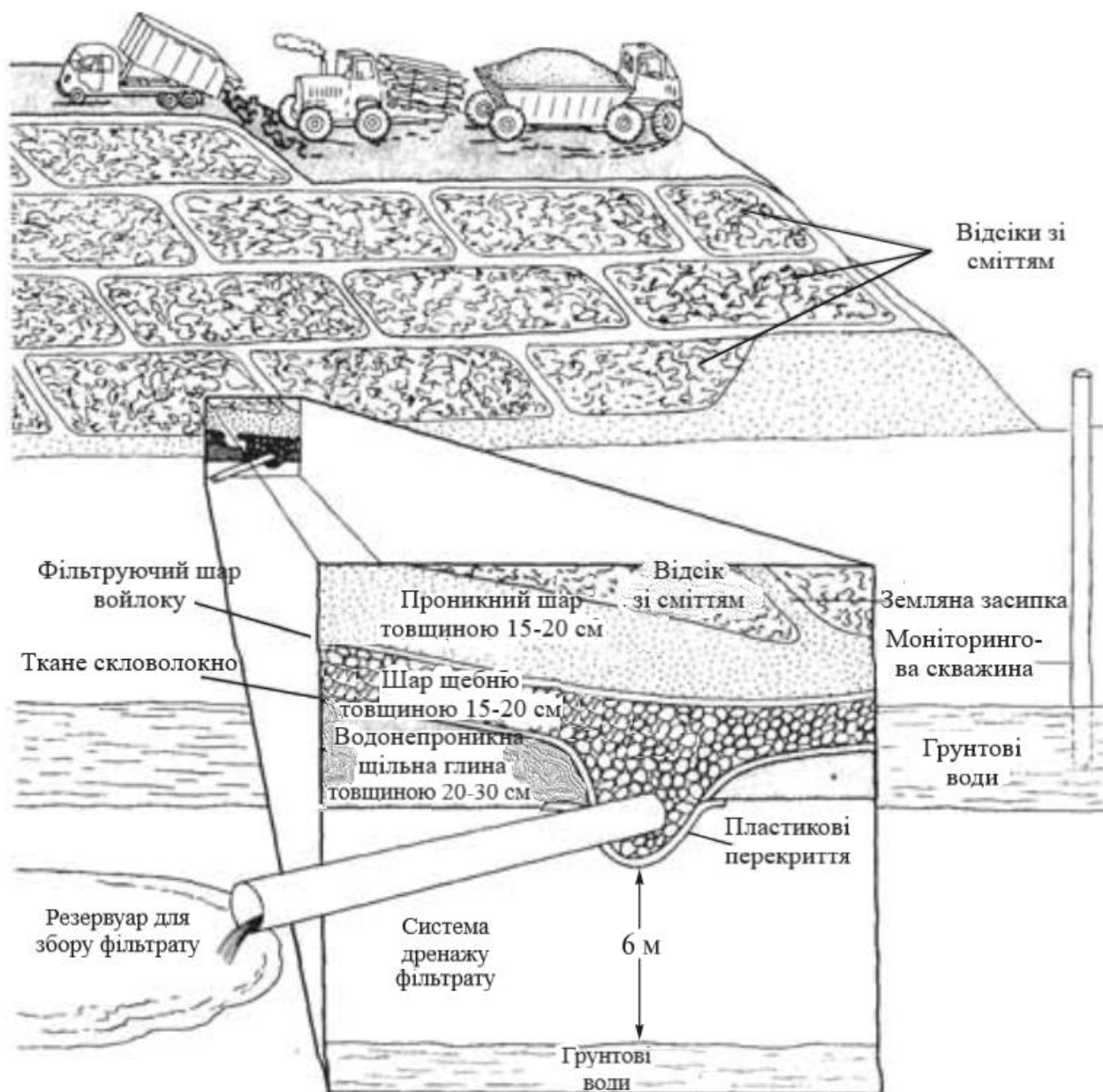


Рис. 2.29. Схема сучасного поховання відходів із системою захисту довкілля

Відходи укладаються шарами у вигляді пірамідоподібного насипу, ущільнюються таким чином, щоб не було рознесення дрібних і легких частинок, і пересипаються шарами піску або глини. Висота шару закладки ТПВ не має перевищувати 2 м. Не допускається спільне складування та зберігання ТПВ з медичними відходами, трупами тварин, з токсичними, вибухонебезпечними промисловими відходами, а також спалювання ТПВ на території полігону. Ущільнені ТПВ покриваються проміжним шаром, який перешкоджає винесення вітром дрібних і легких фракцій ТПВ, розмноженню на поверхні дрібних гризунів, комах, в першу чергу мух.

Після завершення складування відходів і формування насипу верхній шар

відходів укривають замикаючим гідроізолюючим шаром незабрудненого ґрунту – протифільтраційним екраном. Він має запобігати фільтрації атмосферних вод, неконтрольовану емісію біогазу та винесення пиляподібних забруднюючих речовин у навколишнє середовище. При закритті полігону товщина замикаючого шару ґрунту зазвичай становить близько 0,5 м. Покриття може бути багатошаровим, що складається з непроникних і фільтруючих шарів ґрунту товщиною 0,2–0,3 м кожен, що містять шар геосинтетичних мембран, природних сорбуючих матеріалів (сапропелів, цеолітів) потужністю до 0,1–0,2 м.

Повна екологічна рекультивація полігону завершується формуванням рослинного покриву складованих відходів. Для цього насипається шар із родючого ґрунту та ґрунту сумарною товщиною 0,3–0,5 м, висівається трава і висаджується чагарник. Це покращує зовнішній вигляд полігону, оберігає споруду від водної та вітрової ерозії. Поверхневий і ґрунтовий стоки, що надходять на територію, що рекультивується, з вищерозташованих ділянок, відводяться через водовідвідні канали. Зібрану воду скидають на рельєф місцевості нижче рекультивованої ділянки або у водопоглинальні колодязі, що влаштовуються також нижче території, що рекультивується.

Для спостереження за емісією біогазу, вмістом забруднень, що вилугуються, у фільтраційних водах передбачаються моніторингові свердловини. Свердловини для контролю емісії біогазу бурять на глибину 0,5–1,0 м вище за максимальний рівень ґрунтових вод. Свердловини для спостереження за зміною якості ґрунтових вод розташовують по ходу руху ґрунтових вод поблизу полігону, на глибину 1,0–1,5 м нижче за їх мінімальний рівень.

На великих полігонах поховання ТПВ інтенсивність утворення біогазу є високою; економічно виправданим є його відкачування і використання як палива. Для збору біогазу, що утворюється в товщі відходів, прокладають перфоровані труби. Біогаз, що виділяється, містить вологу, природним шляхом може змішуватися з повітрям у вибухонебезпечних концентраціях, тому на лінії збору біогазу передбачають пристрої видалення з нього конденсату вологи, протиполум'яні пастки і переривники для запобігання вибухам. Великі полігони ТПВ можуть розглядатися як свого роду *техногенні родовища метану*. Вже до початку 1990-х років у світі працювало понад 150 комерційних установок з промислового видобутку звалищного біогазу, з них 80 – у США.

Для зменшення емісії метану в атмосферу можна використовувати аерування верхнього шару насипного ґрунту полігонів. Доступ кисню сприяє розвитку метанотрофних мікроорганізмів, що використовують метан для своєї життєдіяльності. Такий мікробний біофільтр може бути сформований

внесенням біопрепаратів на основі метаноокиснюючих бактерій в пересипають і замикаючі шари ґрунту. Можливий варіант аерації тіла звалища повітрям з одночасним відкачуванням суміші повітря і біогазу через колекторні свердловини (ті ж, що використовуються для збору метану).

Вилучені гази звалища подаються на біофільтр, каталітичні реактори, де вони розкладаються на CO_2 і H_2O , або в колони з активним вугіллям для дезодорації газу. Видобуваний газ здатний утворити вибухову суміш, тому всі труби і системи монтуються таким чином, щоб протистояти тиску в 10 бар, і додатково забезпечуються запобіжними клапанами. У посушливий літній період, у періоди підвищеної пожежної небезпеки насипи, що підсихають, зрошують або нагнітають в них зволене повітря для стабілізації умов в товщі відходів.

Інший метод зниження емісії метану і дезодорації газів, що виділяються на рекультивованих полігонах – посадка трав'янистої або чагарникової рослинності з потужною кореневою системою.

Для зменшення маси забруднень, що надходять з полігону з фільтраційними водами, використовують *рециркуляцію та очищення фільтраційних вод* фізико-хімічними або біохімічними методами. Поширені мембранні методи очищення – *ультрафільтрація та зворотний осмос*.

Існуючі технології контролю емісії забруднень застосовуються для великих полігонів, виконаних на високому технічному рівні, і найчастіше не застосовуються для полігонів малих населених пунктів.

За правильною експлуатацією полігонів ТПВ здійснюється постійний контроль відповідними санітарно-епідеміологічними центрами та природоохоронними службами.

Питання з теми:

1. Наведіть способи мікробіологічної переробки рослинної сировини та целюлозовмісних відходів.
2. Які відходи можуть бути перероблені у кормові продукти, збагачені білком одноклітинних організмів?
3. Які мікроорганізми-продуценти білку ви знаєте? Наведіть їхні основні переваги і недоліки.
4. Опишіть основні стадії мікробіологічної конверсії відходів у кормовий білок.
5. Яким вимогам має відповідати процес виділення кормового продукту, збагаченого мікробним білком.
6. Яким вимогам мають відповідати мікроорганізми, що використовуються як продуценти білка при переробці відходів?

7. На чому ґрунтується вибір методу культивування стадії основної ферментації під час збагачення відходів мікробним білком?

8. Переваги і недоліки безперервного та періодичного культивування способів збагачення відходів мікробним білком.

9. Переваги і недоліки глибинного, глибинного гетеро фазного та поверхневого культивування як способів збагачення відходів мікробним білком.

10. Опишіть варіанти твердофазної ферментації під час збагачення відходів мікробним білком.

11. Назвіть переваги та недоліки твердофазної ферментації відходів за участю базидіальних грибів.

12. Яким чином досягаються асептичні умови під час збагачення відходів мікробним білком?

13. Яким чином здійснюється підготовка поживних середовищ під час збагачення відходів мікробним білком? Які складові застосовуються з цією метою?

14. Яким чином здійснюється приготування посівного матеріалу під час збагачення відходів мікробним білком?

15. Яким чином здійснюється забезпечення аеробного ферментаційного процесу киснем під час збагачення відходів мікробним білком?

16. Які існують способи підвищення інтенсивності масопереносу кисню в ферментер під час збагачення відходів мікробним білком?

17. Опишіть порядок запуску ферментера для біоконверсії відходів у асептичних умовах.

18. Які методи доцільно використовувати для виділення клітин мікроорганізмів з рідкого середовища під час збагачення відходів мікробним білком?

19. Які методи доцільно використовувати для концентрування біомаси та білкових речовин з рідкого середовища під час збагачення відходів мікробним білком?

20. Опишіть схему техніко-хімічного контролю типового біотехнологічного виробництва при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів.

21. Які параметри доцільно контролювати на стадіях приготування живильного середовища та підготовки повітря при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів?

22. Які параметри доцільно контролювати під час ферментації при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів?

23. Які параметри доцільно контролювати на стадії виділення біомаси при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів?

24. Які параметри доцільно контролювати на стадії сушіння біомаси при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів?

25. Які параметри доцільно контролювати під час контролю якості готового продукту при отриманні кормової біомаси мікроорганізмів?

26. Які параметри доцільно контролювати під час контролю складу стічних вод під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів?

27. Які технологічні заходи є ефективними для зменшення вмісту сторонньої мікрофлори під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів?

28. Які технологічні заходи є ефективними для зменшення вмісту шкідливих домішок у продукті під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів?

29. Назвіть основні джерела відходів та забруднень виробництва під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів.

30. Назвіть основні варіанти утилізації та зменшення відходів та стоків під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів.

31. Опишіть потенціал мультиензимних композицій під час отримання кормової біомаси мікроорганізмів.

32. Опишіть особливості мікробіологічної переробки в кормові продукти молочної сироватки. Технологічні та виробничі вимоги до відповідних мікроорганізмів-продуцентів.

33. Опишіть особливості мікробіологічної переробки в кормові продукти барди спиртового виробництва. Технологічні та виробничі вимоги до відповідних мікроорганізмів-продуцентів.

34. Опишіть основні етапи переробки післяспиртової зерно-картопельної барди з одержанням білкового кормопродукту.

35. З яких стадій складається комплексна технологія отримання корисних речовин, що містяться в післяспиртовій барді?

36. За яких умов можливе використання активного мулу як кормової добавки?

37. Опишіть основні стадії обробки активного мулу в корм для тварин при високому вмісті в ньому важких металів.

38. Опишіть технологічно важливі складові компоненти відходів, придатних для силосування.

39. Опишіть основні етапи розвитку мікробного комплексу при дозріванні та консервації силосу холодним способом. Дайте характеристику описаним етапам.

40. Чим відрізняються холодний і гарячий спосіб силосування? Опишіть їхні переваги та недоліки.

41. Які добавки можуть застосовуватися під час виробництва силосу? Які

функції вони мають виконувати під час силосування?

42. Опишіть технологічно важливі складові компоненти відходів, придатних для компостування.

43. Опишіть основні стадії компостування. Надайте їм характеристику.

44. За допомогою яких способів здійснюється аерація компостованого матеріалу в такій багатошаровій гряді?

45. Запропонуйте технологічні способи інтенсифікації процесу компостування відходів.

46. Які добавки можуть застосовуватися під час виробництва компосту? Які функції вони мають виконувати під час компостування?

47. Опишіть принципи роботи вертикальних біореакторів для компостування.

48. Чим аеробна стабілізація відрізняється від компостування?

49. Які відходи звичайно піддаються аеробній стабілізації? Чому?

50. За якими параметрами має проходити аеробна стабілізація відходів?

51. Які відходи звичайно піддаються анаеробному зброджуванню та метаногенерації? Чому?

52. Запропонуйте технологію метаногенного зброджування активного мулу, що одержується з очисних споруд міських стоків. Опишіть її основні стадії.

53. Запропонуйте технологію метаногенного зброджування відходів ферми великої рогатої худоби. Опишіть її основні стадії.

54. За якими показниками мають нормуватися відходи, що підлягають метаногенному зброджуванню?

55. Які відходи доцільно піддавати біоконверсії в теплову енергію та паливо? Чому?

56. Опишіть основні варіанти конверсії біомаси в теплову енергію та паливо.

57. Опишіть основні стадії конверсії фотосинтезованої біомаси у водень.

58. Опишіть основні стадії біоконверсії органічних речовин у теплову енергію.

59. Опишіть основні стадії лужного способу одержання біодизельного палива з омиленням метанолом. Його переваги і недоліки.

60. Опишіть основні стадії ферментативного способу одержання біодизельного палива. Його переваги і недоліки.

61. Опишіть основні стадії виробництва біоетанолу. Яку сировину доцільно використовувати в даній технології?

62. Які проблеми потрібно вирішити для масштабного виробництва паливного етанолу з біомаси?

63. Які проблеми потрібно вирішити для зниження собівартості паливного етанолу?

64. Назвіть основні недоліки штамів-сахароміцетів та шизосахароміцетів як продуцентів біоетанолу.

65. Перерахуйте альтернативні мікроорганізми, використання яких є перспективним для підвищення швидкості спиртового бродіння і виходу спирту.

66. Окресліть перспективи іммобілізації клітин мікроорганізмів-продуцентів під час виробництва біоетанолу.

67. Опишіть фізичні методи, які дозволять підвищити вихід етанолу з целюлозовмісної сировини під час виробництва біодизелю.

68. Опишіть основні стадії виробництва біобутанолу. Яку сировину доцільно використовувати в даній технології?

69. Які проблеми потрібно вирішити для масштабного виробництва паливного бутанолу з біомаси?

70. Які проблеми потрібно вирішити для зниження собівартості паливного бутанолу?

71. Назвіть основні недоліки штамів-продуцентів біобутанолу.

72. Назвіть основні переваги і недоліки біобутанолу порівняно з біоетанолом.

73. Опишіть методи, за допомогою яких здійснюють переробку твердих відходів у біодобрива.

74. Опишіть методи, за допомогою яких здійснюють переробку відходів з невисоким вмістом твердої фази у біодобрива.

75. Які показники нормуються під час переробки відходів у біодобрива?

76. Які методи знезараження доцільно використовувати під час переробки відходів у біодобрива? Назвіть недоліки та переваги даних методів.

77. Назвіть основні постулати, на які спирається технологія біологічного землеробства. Завдання біоінтенсивного землеробства.

78. Назвіть головні етапи типового процесу отримання штучного ґрунту.

79. Перерахуйте особливості інтегрованого захисту рослин у порівнянні з традиційною боротьбою зі шкідниками сільського господарства.

80. Окресліть проблеми біодеструкції і лігніновмісних матеріалів.

81. Назвіть найбільш активні мікроорганізми-деструктори деревини. Які існують переваги і недоліки їх використання у переробці відходів? Які мікроорганізми становлять найбільший практичний інтерес?

82. За допомогою яких механічних, фізичних та хімічних методів можна збільшити швидкість біоконверсії та біодеструкції деревини?

83. Від яких факторів залежить біостійкість синтетичних полімерів?

84. Опишіть компонентний склад та основні групи синтетичних полімерів з огляду на здатність складових до біодеструкції.

85. Назвіть найбільш активні мікроорганізми-деструктори пластиків. Які існують переваги і недоліки їх використання у переробці відходів? Які мікроорганізми становлять найбільший практичний інтерес?

86. Які групи ферментів мікроорганізмів-деструкторів пластиків відіграють основну роль в їхній біодеструкції?

87. Які полімерні матеріали можна назвати біорозкладними? Наведіть приклади композицій біорозкладних полімерів.

88. Яким вимогам мають задовільні ти біорозкладні полімери?

89. Опишіть шляхи створення біорозкладних полімерних матеріалів.

90. Наведіть основні етапи виробництва полі(гідр)оксиалканоатів.

91. Наведіть основні етапи виробництва полілактидів.

92. Опишіть основні шляхи введення активаторів фотодеструкції в біорозкладні полімери. Як можна класифікувати сенсibilізатори фотодеструкції за механізмом дії?

93. Опишіть головні фази процесів, що відбуваються у звалищному тілі твердих побутових відходів.

94. Які редокс-зони виникають у звалищному тілі твердих побутових відходів під час біодеструкції органічного субстрату?

95. Опишіть особливості сучасного поховання відходів із системою захисту довкілля.

96. Які заходи можна запропонувати для зменшення емісії метану в атмосферу в звалищному тілі твердих побутових відходів?

ГЛАВА 3. ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯ І ВЕРМИКОМПОСТУВАННЯ

Процеси переробки твердих органічних відходів і субстратів за допомогою культури *дощових* (в англійській та німецькомовній літературі – *земляних*) *черв'яків* (*хробаків*), що використовують органічні речовини як джерело живлення (і водночас середовища існування), називаються *вермикультивування* та *вермикомпостування* (від латинського *vermi*). При переробці відходів цими методами кінцевими продуктами є *біогумус* (органічне добриво) і *біомаса дощових черв'яків*.

Вермикультивування більшою мірою орієнтоване отримання маси дощових черв'яків з їх подальшого використання як кормової добавки у раціонах харчування птахів і свиней, у фармацевтичній промисловості та технологіях знешкодження ґрунтових забруднень, відновлення ґрунтів і

підвищення їх родючості. Метод *біоремедіації*, при якому використовується здатність земляних черв'яків та інших представників ґрунтової мезофауни розпушувати ґрунт, полегшуючи тим самим дренаж води і проникнення газів, називається *біорихленням (bioturbation)*.

Основні *цілі вермикомпостування* – переробка органічних субстратів для отримання удобрювальних компостів (біогумусу) і відновлення родючості ґрунтів, знешкодження побутових відходів, опадів стічних вод, інших відходів, що важко піддаються утилізації.

Дощові (земляні) черв'яки стали об'єктом пильної наукової уваги та практичної діяльності в галузі землеробства, кормовиробництва та екології завдяки своїм унікальним властивостям: невибагливості до умов харчування та утримання, швидкому приросту біомаси та високому вмісту білків у їх тілі. Вони розглядаються в даний час як один з пріоритетних засобів ведення *«біологічного землеробства»* та екологічно чистого сільськогосподарського виробництва, переробки різних органічних відходів.

Дощові черв'яки використовувалися ще з часів Стародавнього Єгипту – ними обробляли наносний мул Нілу для вирощування сільськогосподарських культур. У ХІХ ст. черв'яків стали використовувати і для утилізації відходів рослинного походження. Ч. Дарвін у своїй монографії «Розкладання цвілі овочів під дією дощових черв'яків», опублікованій в 1881 р., і А. Брем описували можливість переробки черв'яками листя, гілок, кори, тирси, шкіри, кісток та ін. Сучасний етап вивчення дощових черв'яків, їх промислового одержання та використання розпочався із зарубіжних досліджень у 40–50-х рр. ХХ ст., коли було доведено збільшення врожаїв сільськогосподарських культур (хлібних злаків та ін.) за допомогою культивування хробаків на земельних угіддях. У 1985–86 р.р. отримано перші вітчизняні лінії хробаків для промислової переробки органічних відходів та здійснено перший великомасштабний досвід запровадження технології вермикультивування у тепличному комбінаті «Весна» поблизу м. Ужгорода.

Однак у промислових масштабах вермикультивування в Україні розпочато з 1989 р., коли було завезено селекційні культури хробаків із Польщі та Угорщини. З 1991 р. проводяться дослідження щодо розведення черв'яків та отриманням біогумусу.

В даний час у багатьох країнах створено і успішно розвиваються десятки тисяч комерційних господарств і близько 1000 великих біофабрик з вирощування дощових черв'яків і отримання біокомпостів, що постачають підприємцям маточну культуру черв'яків і обладнання. Найбільшого

поширення вермикультивування та вермикомпостування набули у США, Канаді, Китаї, Індії, Південній Кореї, Австралії, Італії, Мексиці, на Кубі.

Варто відзначити, що потенціал для розвитку вермикультури в Україні великий, також є великими потреби в біогумусі, а сировини у вигляді різних органічних відходів більш ніж достатньо. У результаті численних наукових досліджень та практичних робіт з'ясовано властивості біомаси промислових видів дощових черв'яків, умови їх розведення, а також переробки ними різних відходів.

3.1. Особливості дощових хробаків як біологічних об'єктів культивування

Дощові черв'яки – це безхребетні тварини, що належать до найдавніших мешканців Землі. Їхній вік налічує 600 млн років. Назва «дощові черв'яки» збірна, що застосовується до всіх більш менш великих представників п'яти різних сімейств типу кільчасті черв'яки класу олігохет, що існують у ґрунті. Найважливішою особливістю будови олігохет є правильна повторюваність окремих сегментів (кілець) вздовж осі червоподібного тіла тварини. При розмноженні дощові черв'яки відкладають яйця в кокон. Зазвичай у кожному коконі є лише одне яйце, рідше два чи три.

При зовнішній схожості між собою сімейства дощових черв'яків розрізняють, головним чином, за особливостями будови внутрішніх органів, зокрема органів розмноження, за розташуванням пояска, щетинок та іншим ознакам.

Усього за різними даними Землі живе від 3 до 8 тис. видів дощових черв'яків. На території України налічується близько 15–18 видів.

Харчуються черв'яки мертвими рослинними тканинами, що розкладаються, які надходять у ґрунт у вигляді опаду, корневих і пожнивних залишків, а також тваринними залишками. Разом з ними вони заковтують і різних представників ґрунтової мікрофлори: бактерії, водорості, гриби та їх спори, а також найпростіших і нематод. Деякі з видів дощових черв'яків є типовими споживачами гумусу і віддають перевагу верхньому шару ґрунту (*гумусоспоживачі*, епігейні черв'яки), інші живуть у середніх шарах ґрунту, а деякі живуть на глибині до 2 м. Види і популяції черв'яків, що зустрічаються в гною та інших негуміфікованих органічних субстратах – *гумусоутворюючі*.

Забарвлення черв'яків різне. До родів з червоним забарвленням належать *Lumbricus*, *Dendrobaena* і *Eisenia*, які мешкають переважно в підстилці і

верхніх, багатих гумусом горизонтах; Представники родів *Allolobophora*, *Octolasion* і *Eiseniella* мають забарвлення від сірої до зеленої.

Біомаса дощових хробаків у ґрунті становить 50–72 % від усієї біомаси ґрунтової мезофауни. У природних місцях проживання дощових хробаків (луги, пасовища, ріллі) загальна їх кількість у ґрунті може досягати 10^6 – 10^7 особин/га, а біомаса 10^3 – 10^4 кг/га.

Оптимальні умови життєдіяльності дощових хробаків

Харчування. При недостатньому харчуванні ріст та розвиток черв'яків сильно сповільнюються, вони гинуть. Дощові черв'яки потребують насамперед азотовмісної органіки, запаси якої в ґрунті обмежені, тому найбільша чисельність, темпи індивідуального росту і плодючість черв'яків зазвичай спостерігаються в місцях локалізації органічного субстрату, багатого азотом (на пасовищах, поблизу екскрементів травоядних тварин тощо). Азот, що міститься в ґрунтовій мікрофлорі та мікрофауні, що заковтується і перетравлюється черв'яками, майже повністю ними засвоюється. Оптимальне відношення С : N в органічному субстраті має бути близько 1 : 20. Крім азотовмісних речовин (білків, амінокислот) органічні матеріали, що переробляються, мають містити вуглеводи, різноманітні мінеральні речовини, вітаміни, а також клітковину або інші речовини, відсутність яких ускладнює травлення. У їх складі також мають бути присутні мінеральний інертний наповнювач, пісок або ґрунт.

Вологість. Вологість субстрату 60–80 % є оптимальною. Після дощів, коли у ґрунті багато води, дощові черв'яки виповзають на поверхню. У разі прогресуючого підсихання спостерігається переміщення хробаків у більш вологі зони. Якщо вміст вологи в ґрунті тривалий час нижче за 30–35 %, чисельність черв'яків знижується, хоча вони можуть без шкоди втрачати 50–60 % води від маси тіла. При вологості ґрунту 22 % черв'яки гинуть протягом одного тижня. При вирощуванні дощових хробаків у лабораторних умовах їх максимальна вага і плодючість досягаються при вологості субстрату 70–85 %, тобто близька до вмісту води в тілі дощового хробака.

Температура та рН. Температура +15...+25 °С і рН оточуючого середовища 7,0–7,6 оптимальні для розмноження дощових черв'яків. На полях без рослинності та їжі черв'яки гинуть за температури, близької до нуля. Від холоду черв'яки рятуються, йдучи в глибші горизонти ґрунту. Так само вони уникають високих температур. Дощові черв'яки не живуть у середовищі з рН < 5,0 або рН > 9,0.

У помірних широтах у теплу пору року активна діяльність дощових черв'яків триває до семи місяців. У зимовий період дощові черв'яки впадають у

сплячку. При зниженні температури нижче $+10^{\circ}\text{C}$ вони починають переходити в стан спокою, при $+6^{\circ}\text{C}$ – перестають харчуватися, а при $+4\dots+5^{\circ}\text{C}$ у них звільняється вміст травного тракту. З початком заморозків і промерзання верхнього горизонту ґрунту на 5–6 см вони йдуть у глибокі шари ґрунту. Навесні, з початком відлиг дощові черв'яки переходять в активний стан за 10–15 днів до зникнення мерзлого шару ґрунту, причому вони можуть виповзати навіть на сніг.

Освітлення. Багато черв'яків бояться світла і ультрафіолетових променів, тому для пошуку статевого партнера вони виповзають зі своїх норок тільки вночі, тому зона їх проживання не має висвітлюватися ні природними, ні штучними джерелами світла.

Аерація та продукти гниття. Види черв'яків, придатні для вермикультури, в природних умовах, існують переважно в поверхневому шарі ґрунту, що добре аерується. Вони надзвичайно чутливі до виділення газів, що утворюються у процесі гниття: аміаку, сірководню, метану. Допустимий рівень вмісту аміаку 0,5 мг/кг субстрату. При більш високому вмісті газу черв'яки гинуть. Тому в промислових установках вермикультивування намагаються уникати утворення мертвих (застійних) зон і підтримують вміст кисню в газовій фазі щонайменше 15 %, а CO_2 – трохи більше 6 %.

Щільність популяції. На розмноженні черв'яків негативно позначається перенаселеність субстрату, що переробляється: черв'яки відчують стрес і збуджуються. У подібних умовах можливі випадки канібалізму. Тому густина популяції є важливим контрольованим показником.

Види, придатні для вермикультивування та вермикомпостування

Оскільки польовим умовам притаманна циклічність, непостійність і неоптимальність умов для зростання черв'яків, завдання промислових методів вермикомпостування та вермикультивування – створення високопродуктивних та адаптованих до різних субстратів ліній дощових черв'яків, підтримання оптимальних умов їх утримання в лабораторних та промислових культиваторах, що приводять до збільшення швидкості зростання та розмноження черв'яків. По відношенню до субстратів, що переробляються, черв'яки мають володіти не тільки підвищеною здатністю споживати субстрат і високою швидкістю його розкладання, але й швидко адаптуватися до зміни виду субстрату і бути стійкими до захворювань.

З усієї різноманітності дощових хробаків для вермикультури придатні лише кілька видів (рис. 3.1):

– гнійний хробак *Eisenia foetida*;

- підвиди *E. foetida foetid*, *foetida andrel*;
- звичайний дощовий черв'як (або великий червоний виповзок) *Lumbricus terrestris*;
- малий червоний хробак (малий виповзок) *Lumbricus rubellus*;
- декілька інших видів (дендробена *Dendrobaena* та ін).



Eisenia foetida



Lumbricus terrestris



Dendrobaena veneta



Lumbricus rubellus

Рис. 3.1. Дощові хробаки, придатні до вермикультивування

Найбільш широко використовується у вермикulturі гнойовий (компостний) хробак *E. foetida*. Цей хробак широко поширений у світі, у тому числі в Україні: біля житла людини, у скупченнях гною, гнилої соломи, у парниках, де їхня кількість нерідко досягає 1000 особин/м².

E. foetida – порівняно невеликий черв'як довжиною 6–10 см. Колір його сегментів темно-червоний або червоно-коричневий, з світлішими борозенками, що розділяють сегменти. У природних умовах кожна статевозріла особина *E. foetida* дає щотижня 1–2 кокони, з яких приблизно через 3 тижні виводиться від 2 до 20 ювенільних особин – черв'ячків (з них виживають у середньому 4). Через 3 місяці черв'ячки, що вилупилися з коконів, стають статевозрілими. У середньому протягом року 1 черв'як дає потомство 200–400 особин. Молоді особини при досягненні статевої зрілості важать до 0,5 г. Дорослі особини живуть 10–15 років, досягають довжини до 8–10 см при масі до 1,0 г.

У 1959 р. у США в штаті Каліфорнія був виведений гібрид гнійного

черв'яка *E. foetida*, який отримав назву *червоного каліфорнійського хробака* (*Eisenia foetida red hybrid of California*) (рис. 3.2). Цей хробак відрізняється високою інтенсивністю харчування та швидкістю утилізації вихідних субстратів – за сприятливих умов органічні відходи переробляються за 1–2 місяці, швидким статевим дозріванням (6–8 тижнів), високою плідністю – відкладає до 10 коконів на тиждень (на рік – до 70 коконів) з урахуванням циклу розмноження), дає 4–5 поколінь на рік за високого коефіцієнта розмноження (1 : 1500 протягом року) і має велику тривалість життя (до 15–16 років). Максимального розміру особини червоного каліфорнійського хробака (ЧКХ) досягають у семимісячному віці, коли їх маса становить у середньому 2,4 г. Важлива особливість ЧКХ – *втрата інстинкту* залишати своє місцеперебування за несприятливих умов середовища. Тому його можна розводити в грядках просто неба, не побоюючись втрати популяції. Він добре розмножується в неволі на різних відходах – усіх видах гною, соломі, макулатурі, листовому опаді, побутовому смітті. Червоний каліфорнійський черв'як сьогодні найбільш широко застосовується у багатьох країнах у промисловому вермикомпосуванні і вермикультивуванні.



Рис. 3.2. Червоний каліфорнійський хробак (*Eisenia foetida red hybrid of California*)

Недолік ЧКХ – його тропічне походження і, як наслідок, теплолюбство. Тому в умовах помірної кліматичної зони, характерної для України, його можна вирощувати лише у приміщеннях чи теплицях. Перспективними для використання у відкритих ґрунтах вважаються черв'яки інших видів: малий і великий виповзки, місцеві раси гнойового хробака, лісової дендробени. У багатьох випадках червоний каліфорнійський хробак, який рекламується деякими підприємствами в Україні, таким не є, а є місцевими популяціями, що пройшли відбір і адаптовані до умов штучного розведення та різних органічних відходів. Витрачається на таку адаптацію близько 2–3 років. Крім того, внаслідок недотримання технології та санітарно-ветеринарних правил

більшість із розповсюджених рас дощових хробаків *заражені нематодами* – круглими хробаками-паразитами, багато з яких фітопатогенні для сільськогосподарських рослин (картофеля, буряків, моркви тощо) і знижують їх урожайність. Боротьба з нематодою надзвичайно складна та малоуспішна.

Промислові лінії черв'яків *E. foetida* відносно невибагливі до харчування. Найкраще вони розмножуються на органічних субстратах, попередньо підданих мікробіологічному компостуванню, проте деякі лінії можуть добре розмножуватися на субстратах на основі гною великої рогатої худоби, коней, свиней, птахів, а також сапропелю, осаду стічних вод. При вирощуванні на відходах за оптимальних умов проживання (температура субстрату 22 °С, вологість 75 %, рН 7,0) цикл розвитку черв'яків триває 160 діб. Протягом року вони роблять 2 цикли розмноження і збільшують свою чисельність більш ніж у 1000 разів.

До теперішнього часу отримані більш продуктивні промислові лінії дощових черв'яків, адаптовані до різних типів відходів, включаючи забруднені такими шкідливими сполуками, як поліароматичні вуглеводи, поліхлоровані біфеніли, пестициди, важкі метали та радіонукліди. Серед різних різновидів дощових черв'яків деякі лінії отримані шляхом схрещування диких рас *Eisenia foetida* та ЧКХ з подальшою селекцією за необхідними ознаками.

Перспективним для вермикультури є болотяний черв'як *Eiseniella tetraedra*, що існує повсюдно в Україні. Він невибагливий, витримує умови черезмірного зволоження, дефіцит кисню, стійкий до продуктів гниття і може розводитися просто неба.

3.2. Властивості продуктів та застосування вермикультивування та вермикомпостування

У результаті переробки органічних відходів дощовими хробаками отримують *біогумус*.

Біогумусом, інакше званий *вермикомпостом*, є матеріал, що пройшов через кишковник хробака, і залишки вихідного субстрату. Хробаки пропускають через кишковник різні речовини: рослинні залишки, органічні відходи, мінеральні речовини ґрунту. Проходячи через травний тракт черв'яків, вони піддаються подрібненню та суттєвим біохімічним змінам: органічні сполуки розщеплюються на більш прості речовини, збагачуються сполуками калію, магнію, фосфору та ферментами (каталазою, уреазою, дегідрогеназою). Мінеральні солі трансформуються у легкодоступні форми для рослин, при

цьому також відбувається нейтралізація кислот, що містяться в первинному субстраті.

У процесі перетравлення рослинних залишків у кишечнику черв'яків зменшується вміст легко- і важкогідролізованих полісахаридів і лігніну, одночасно розвиваються процеси поліконденсації низькомолекулярних продуктів розпаду органічних речовин, утворюються молекули гумінових кислот, що мають нейтральну реакцію. В результаті продукт життєдіяльності черв'яків – *копроліти* (від грецьк. копрос – послід, літос – камінь) являє собою матеріал, збагачений біологічно активними сполуками, гуміновими речовинами і корисною мікрофлорою та наближається за своїми фізико-хімічними властивостями до ґрунтового гумусу. За вмістом гумусу біогумус перевершує гній та компости в 4–10 разів. У копролітах черв'яків природних популяцій міститься 11–15 % гумусу, а в копролітах культивованих – від 25 до 35 % на суху речовину. Вартість вермикомпостів безпосередньо визначається вмістом гумусу.

Як органомінеральне добриво біогумус має цінні фізичні властивості: високу вологоємність, вологостійкість і механічну міцність, сипкість, технологічність у використанні. Азоту в ньому в 5 разів, фосфору – у 7 разів, калію – в 11 разів більше, ніж у ґрунті, в якому живуть черв'яки. У 1 г сухого біогумусу міститься 10^{10} – 10^{11} клітин мікроорганізмів (для порівняння у гнію великої рогатої худоби 10^8 – 10^9 кл./г) за відсутності патогенної мікрофлори та зоофауни, життєздатного насіння бур'янів. Різноманітна мікрофлора (актиноміцети, бактерії-амоніфікатори, нітрифікатори, розчиняючі органічні та мінеральні фосфати, целюлолітики та ін.), що присутня в біогумусі, нормалізує розвиток властивих здоровому ґрунту мікробних асоціацій і забезпечує придушення ґрунтових патогенних мікроорганізмів, зокрема сальмонел. Біогумус містить біологічно активні речовини – лумбрицини, що виробляються хробаками, ауксини, гібереліни та інші фітогормони. Біогумус не має канцерогенних, мутагенних або тератогенних властивостей.

Іншою перевагою вермикомпостів є відсутність неприємних запахів – у процесі переробки будь-який матеріал дезодорується через кілька днів і набуває земельного запаху.

Завдяки своїм механічним, фізико-хімічним властивостям і високому вмісту поживних елементів, фітогормонів та інших біологічно активних речовин, біогумус прискорює проростання насіння і терміни дозрівання плодів (на 10–15 діб), збільшує відсоток схожості насіння, що скорочує їх норму висіву, підвищує посухостійкість та морозостійкість рослин, їх стійкість до

шкідників та хвороб, знижує стрес при пересадці рослин, стимулює коренеутворення. Внесення у ґрунт біогумусу виключає перенасичення її окремими видами поживних елементів, як це трапляється при внесенні високих доз гною та звичайних компостів. Вермикомпост добре поєднується з тими чи іншими мінеральними та хімічними добривами.

Типові норми внесення біогумусу під основні сільськогосподарські культури становлять 4–10 т/га, на відміну від гною, якого потрібно щорічно вносити 30–40 т/га.

Якщо 1 т підстилкового гною, внесений у ґрунт, забезпечує збільшення врожаю (на рік використання) зернових 10–12 кг, картоплі – 100–120 кг, то 1 т біогумусу забезпечує збільшення врожаю зернових 100–200 кг, картоплі – 1600–1800 кг і більше, а овочів – 2000 кг. Ґрунт залишається високородючим і в наступні роки (протягом 5–7 років).

Ще більш ефективні суміші біогумусу з хімічними мінеральними добривами, з мікробними препаратами, що мають, зокрема, фунгіцидну активність. Так, біогумус з добавками мікробних препаратів на основі *Trichoderma viridae* або *Bacillus subtilis* не тільки є високоефективним добривом, але і захищає сільськогосподарські культури від корневих гнилей, зменшує загибель розсади, що прискорює ріст і розвиток рослин. Позитивну біологічну фітоактивність мають і водні витяжки з біогумусу.

На відміну від гною, за винятком випадків, коли вермикомпости отримують з субстратів з високим вмістом забруднень, не існує будь-яких санітарно-гігієнічних та екологічних обмежень на норми їх внесення в ґрунт – чим більше вноситься біогумусу в ґрунт, тим краще і тим вища врожайність культур.

Виробництво біогумусу не вимагає великих капіталовкладень, що окупається протягом 0,5–2,0 років, є екологічно ефективним.

Поряд з біогумусом вермикультивування дозволяє отримувати іншу товарну продукцію – біомасу дощових черв'яків, багату на повноцінний кормовий білок і жири. У сухій біомасі хробаків може міститися до 60–65 % білків і до 20 % жирів. Ця білково-вітамінна кормова добавка має високу біологічну цінність. Порівняно з білком м'ясних та рибних продуктів білок дощових хробаків містить більше таких незамінних амінокислот, як лізин та метіонін. За сукупним складом борошно з черв'яків перевершує рибне та соєве борошно, є чудовим стартовим кормом для рибної молоді, підвищує товарні та смакові якості м'яса бройлерів.

При годівлі птахів, свиней, хутрових тварин, ставкової риби когут використовуватися живі черв'яки, в запареному вигляді, а також білкові кормові добавки сухих і розмелених черв'яків у вигляді преміксів.

Для багатьох тварин дощові черв'яки – природна їжа (для птахів, риб, свиней та ін.). У деяких країнах (країни Південно-Східної Азії) верми-протеїн використовують у кулінарії як харчову добавку (у м'ясний фарш, гастрономічні вироби, хліб). На його основі запропоновано готувати мікробіологічні живильні середовища.

Проводяться дослідження щодо застосування білкових речовин і витяжок з хробаків у медицині та парфумерії, як протекторних засобів, у дитячому лікувальному харчуванні. Ферменти, що виділяються з біомаси хробаків, мають протеолітичну, амілолітичну, ліполітичну активність, входять до складу синтетичних миючих засобів, зубних паст і шампунів, комерційних препаратів для очищення забрудненого ґрунту і води, поверхні трубопроводів та обладнання.

Потенційно коефіцієнт біоконверсії відходів у біомасу хробаків може сягати 7–10 %, тобто з 1 т відходів можна отримувати 70–100 кг черв'яків (за сухою речовиною) або 8–10 кг сухої маси черв'яків на 1 т вологого підстилкового гною або посліду.

Найбільший ефект при згодовуванні хробаків спостерігається при додатку до незбалансованих кормів. Так, для молодняка птиці та мальків риб прирости ваги при цьому підвищуються на 3–10 г на кожен грам доданої в корм сухої маси черв'яків. Крім того, за несприятливих умов підвищується їх виживання.

Стадо з 1 тис. голів птиці (бройлери) виробляє за добу близько 140 кг посліду (80 % вологості) або 50 т/рік. З цієї кількості посліду можна виробити близько 100 т компосту (з додаванням, наприклад, соломи) і отримати з нього близько 1 т сухої біомаси дощових черв'яків. На кожне стадо в 1000 голів необхідно згодовувати по 3,0 кг черв'яків (у перерахунку на суху масу) щодня протягом 8 тижнів вирощування або по 3 г черв'яків на одну голову птиці на добу, що призводить до підвищення приросту ваги на 15–20 г на одну голову птаха на добу. Для переробки утворюються 100 т компосту на рік потрібно задіяти 60 м² площ закритого типу (зимових теплиць) при використанні черв'яків володимирських рас або 40–45 м² при використанні ЧКХ.

На свинокомплексі, де щорічно вирощують 10 тис. свиней і утворюється до 20 тис. т гною у вигляді підстилки, при його переробці можна отримати близько 200 т біомаси живих черв'яків і 8 тис. т біогумусу (50 % вологості з

вмістом 15 % гумусу). Для переробки 20 тис. т підстилкового гною потрібно задіяти 1 га площі для культиваторів польового типу (під відкритим небом) або 0,6 га зимових теплиць.

При дотриманні заходів, що перешкоджають автолізу білків і окислення жирів дощових черв'яків, технологія їх сушіння та отримання з них білкового борошна не відрізняється істотно від технології приготування рибного або м'ясо-кісткового борошна. Однак, оскільки дощові черв'яки можуть бути носіями та проміжними господарями різних паразитів: найпростіших, нематод та інших, перед згодовуванням живої біомаси дощових черв'яків потрібна їх пастеризація.

Вермикомпостуванню і знешкодженню в тій чи іншій мірі піддаються сільськогосподарські відходи, гній і пташиний послід, побутове сміття, опади стічних вод, відходи харчової, целюлозно-паперової, деревообробної, шкіряної, гідролізної, фармацевтичної та інших галузей промисловості, різні матеріали, забруднені токсичними речовинами.

У природних умовах деградація відходів продовжується тривалий час (кілька років і більше). При вермикомпостуванні розкладання органічного матеріалу прискорюється в 2–10 разів, спостерігається зменшення обсягу органічних відходів на 40–60 %, відбуваються дезодорація та знезараження компосту, частково знижується зараженість патогенами, зокрема сальмонелами та яйцями гельмінтів.

Хоча останнім часом селекціоновані промислові лінії дощових черв'яків, здатні переробляти різні органічні субстрати, такі відходи, як свіжий гній (коров'ячий, свинячий) і послід птахів, зазвичай важко піддаються вермикомпостуванню через велику концентрацію в них аміаку, сечової кислоти, сечовини, які токсичні для дощових хробаків.

Для культивування черв'яків і переробки цих органічних відходів в біогумус останні мають спочатку піддаватися витримуванию в природних умовах (у теплу пору року свинячий гній – 5–6 міс, гній великої рогатої худоби – 3–4 тижні, послід кроликів 5–10 сут), при якому відбуваються процеси анаеробного зброджування гною, або піддаватися мікробіологічного компостування. Для цього гній або послід попередньо перемішують з соломою, тирсою, сіном, макулатурою або іншими органічними наповнювачами у співвідношенні 1 : 1 (за сухою речовиною). Можна використовувати торф, нейтралізований добавками вапна або доломіту. Після попереднього витримувания або компостування гній або послід піддають вермикомпостуванню.

Біогумус, отриманий при переробці гною великої рогатої худоби за допомогою промислових ліній дощових черв'яків, містить:

- вологи – 40–60 %;
- загального азоту – 3–4 %;
- загального фосфору – 1–3 %;
- гумінових речовин – 22–30 %.

Вермикомпостування різних рослинних субстратів можна істотно прискорити шляхом їх попередньої обробки: запарюванням, частковим гідролізом хімічними реагентами або обробкою целюлолітичними мікроорганізмами або ферментами. Передобробка дозволяє зробити доступними для вермикомпостування такі субстрати як кора дерев, лігнін. Вважають, що «розм'якшені» відходи краще перетравлюються і засвоюються дощовими хробаками, не чинячи на них токсичної дії.

Однак стосовно такого дешевого продукту, як вермикомпост, передобробка субстрату виявляється економічно не вигідною через високу енергоємність і трудомісткість операції. Як інший варіант прискорення вермикомпостування пропонується використання мікробних препаратів, що активують зростання черв'яків.

Приклад композиції для вермикопостування гною спільно з іншими відходами (наведено об'ємні співвідношення):

- гній ВРХ – 45–50 %;
- свинячий або овечий гній – 5–10 %;
- торфо-гноювий компост – 15–20 %;
- солома, кукурудза – 15 %;
- відходи овочівництва – 5 %.

Для ліній черв'яків, селекціонованих для переробки відходів целюлозно-паперового комбінату, оптимальні композиції наступного складу, що відрізняються залежно від методу та умов культивування:

- кора 1–2-річного терміну зберігання – 25–50 %;
- кора 30-річного терміну зберігання – 0–20 %;
- надлишковий активний мул – 20–45 %;
- річковий пісок – 10–30 %.

Дотримання оптимальних пропорцій дозволяє досягти повної переробки вихідного субстрату за 2,5–3,0 міс.

Біогумус має цінні характеристики для ремедіації забруднених, рекультивації та реабілітації виснажених ґрунтів. Внесення вермикомпосту покращує структуру ґрунту, його фізико-хімічні властивості, стійкість до

вітрової та водної ерозії, скорочує терміни заповнення гумусу та відновлення родючості ґрунтів. Внесені гумінові речовини забезпечують процеси мікробної деградації органічних забруднень необхідною енергією, кофакторами, частково поживними речовинами. В результаті підвищується деструктивна активність ґрунтових мікроорганізмів, прискорюються процеси розкладання різних токсичних речовин, що потрапили в ґрунт, процеси самоочищення ґрунтового середовища. Гумус, що має підвищені сорбційні і сполучні властивості до багатьох забруднень, включаючи такі, як поліароматичні вуглеводні, важкі метали і радіонукліди, істотно зменшує їх надходження у рослинну сільськогосподарську продукцію. Наприклад, внесення біогумусу в кількості 5–7,5 т/га знижує в ґрунті вміст радіонуклідів на 30 % і зменшує їх надходження в рослини на 60–70 %.

Інший шлях поліпшення властивостей ґрунтів можливий шляхом внесення живої культури хробаків (польове вермикультивування, метод біопушення при ремедіації ґрунту). Для цієї технології більше підходять не черв'яки-гумусоутворювачі («гнійні»), що виробляють біогумус, а черв'яки-гумусопоживачі («ґрунтові»), які не тільки утворюють біогумус, але й окультурюють ґрунт і тим самим підвищують його родючість.

За добу черв'як пропускає через травний тракт кількість ґрунту і рослинних залишків (детриту), що дорівнює масі свого тіла. За нормальних умов середовища та достатньої чисельності (близько 50 особин на 1 м²) дощові черв'яки в середній смuzі за сезон пропускають через свій кишечник від 10 до 30 т ґрунту на 1 га і прокладають близько кілометра ходів на кожному квадратному метрі площі.

Розпушення ґрунту земляними черв'яками полегшує дренаж води та проникнення газів, коренів рослин у підґрунтя. Завдяки діяльності черв'яків органічні матеріали в ґрунті, включаючи забруднені, швидше розкладаються і розподіляються більш рівномірно, ґрунт збагачується не тільки біогумусом-копролітами, а й вітамінами, фітогормонами та іншими біологічно активними сполуками, рухомими формами поживних речовин (P₂O₅ і K₂O). У польових дослідах при створенні щільності популяції черв'яків у дерново-підзолистому супіщаному ґрунті 400–500 особин/м² врожайність зернових підвищувалася в 1,5–2,0 рази.

Вермикультуру запропоновано використовувати для ремедіації ґрунтів, забруднених радіонуклідами. Внесені в ґрунт черв'яки покращують дренажність ґрунтів, що сприяє виведенню радіонуклідів у більш глибокі підґрунтя горизонти. Також за допомогою хробаків радіонукліди можна

витягувати із ґрунту. Радіонукліди накопичуються в масі хробаків. Хробаки збираються з використанням приманки і спалюються, зола, що залишилася, пресується.

Як варіант підвищення ефективності методу біоремедіації можна використовувати комбіноване очищення забруднених ґрунтів за допомогою мікроорганізмів-деструкторів та дощових черв'яків. Така двостадійна схема була запропонована для очищення ґрунтів, забруднених поліхлорировані біфеніли. На першій стадії вільні та пов'язані з гуміновими речовинами ґрунти поліхлоровані біфеніли розкладаються за допомогою бактерій-деструкторів, на другий отриманий матеріал обробляється за допомогою дощових черв'яків. Для дезактивації ґрунтів, забруднених радіонуклідами, існує комплексна технологія, що включає біоаккумуляцію дощовими хробаками, обробку мікроорганізмами та біосорбентами. Забруднену радіонуклідами біомасу черв'яків озолують, заскляють і захоронюють на спеціальних полігонах. Загальна схема проведення ремедіаційних заходів, що включає використання спеціалізованих мікроорганізмів і дощових черв'яків, представлена на рис. 3.3.

Основні умови використання дощових черв'яків у полі:

- внесення у пухкий та м'який ґрунт;
- вміст розчинних солей, у тому числі внесених із золою, не має перевищувати 0,5%;
- рН ґрунту має бути близьким до нейтрального ($7,0 \pm 0,5$); для вирівнювання кислотно-лужної рівноваги ґрунту необхідно вносити гіпс (для лужних ґрунтів) або карбонат кальцію – крейду, вапно або доломітове борошно (для кислих ґрунтів);
- вологість ґрунту має бути досить високою (вище 30 %, оптимальне значення 60–70 %);
- необхідно оберегати хробаків від їхніх природних ворогів: птахів, кротів, землерийок та інших;
- використання хімічних пестицидів, що гнітять розвиток дощових черв'яків, у полі з вермикультурою є неприпустимим.

Дощові черв'яки стійкі до вмісту у ґрунті: бензину – 70 мг/кг, дизельного палива – 2000 мг/кг, нафти – 5000 мг/кг.

Поєднання вермикомпостування і вермикультивування з раціональною сівозміною є одним з прийомів, що використовуються в технології біологічного землеробства. Використання великих доз біогумусу (40–100 т/га) у цій технології різко (в 5–10 разів) збільшує врожайність культур, що скорочує необхідні для їх обробки площі, витрати на оранку, посіви, внесення хімічних

добрив, збирання врожаю, роблячи сільськогосподарське виробництво конкурентоспроможним.



Рис. 3.3. Принципова схема ремедіації ґрунтів біотехнологічними методами з використанням вермикультури

3.3. Технологічні основи вермикультивування та вермикомпостування

Під час застосування в якості добрив, засобів рекультивації або кормової добавки вермикомпост і вермикультура не повинні бути дорогими продуктами, тому найбільш поширені способи та технології їх отримання мають бути відносно простими.

За ступенем створення оптимальних умов *способи компостування* можна поділити на три *групи*:

- на *відкритих* майданчиках або польове вермикультивування та вермикомпостування – менш контрольовані умови;
- у *закритих* приміщеннях – більш контрольовані та оптимальні умови;
- *комплексні* (одночасно на відкритих майданчиках і в закритих приміщеннях).

Компостування відкритим способом в організації процесу більш просте, дешеве та екстенсивне, у закритих приміщеннях – більш інтенсивне (продуктивніше на одиницю площі або обсягу), проте різниця не дуже велика, оскільки швидкість росту та розвитку дощових черв'яків у закритому приміщенні лише ненабагато (в найкращому випадку в 2–3 рази) вище, ніж на відкритих майданчиках. Вермикомпостування на відкритих майданчиках більше підходить для регіонів із відносно м'яким та теплим кліматом. Закриті приміщення – теплиці, спеціалізовані цехи тощо у зимовий час мають опалюватися.

В умовах відкритого ґрунту в Україні можна провести максимум два повні цикли переробки відходів протягом літнього сезону. При використанні опалюваних приміщень, що забезпечують підтримку оптимальних умов переробки, і гібридів дощових черв'яків на основі ЧКХ протягом року можна здійснити 4–5 циклів вермикомпостування по 2,5 місяця кожен.

За *методами культивування* переробку органічних відходів за допомогою дощових черв'яків можна розділити на *грядову* (буртову), *траншейну*, *ящикову*, *реакторну*. Під *відкритим небом* використовують буртовий і траншейний варіанти. В умовах *закритого ґрунту* – переважно буртовий, ящиковий та реакторний методи.

У країнах із теплим кліматом найчастіше застосовують вермикультивування, засноване на відкритій грядовій формі вмісту черв'яків. Грядові (буртові) та траншейні методи розраховані на теплу пору року. У зимовий час при додатковому невеликому укритті черв'яки нормально

перезимовують, але процес вермикомпостування при цьому не йде.

Залежно від кліматичних умов і виду відходів цикл компостування в одній гряді або траншеї становить 3, 6 або 12 місяців. В умовах теплиць процес вермикомпостування може тривати цілий рік. Застосовують плівкові теплиці тунельного типу з обігрівом. В них можна проводити процес інтенсивними методами.

Спочатку проводять *підготовку субстрату* для вермикомпостування. Для проведення процесу на відкритих майданчиках за буртовою або грядовою технологією з приготовлених відходів на підготовленій бетонній або ґрунтовій основі формують гряди розміром (1,0–1,5) x (1,5–2,0) м на підґрунті та висотою 0,15–0,40 м. Такі розміри гряд обумовлені необхідністю рівномірного розселення вермикультури по всій масі субстрату, гарної аерації матеріалу і уникнення надлишкового тиску на живі організми в товщі субстрату. Укладається бурт у вигляді піраміди або трапеції у перерізі. Гряди розташовують відповідно до троянди вітрів (для зменшення вітрової ерозії). Визначене значення для підтримки в подальшому оптимального температурного режиму має і просторове розташування (по відношенню до сторін світла) вермигряд, а також колір і товщина покриття, що мульчує (утеплює) гряди. Відкриті майданчики мають бути сплановані з невеликим ухилом, що забезпечує стік надлишкової води. Для забезпечення нейтрального значення рН вносять гіпс (для залужених субстратів), крейду, доломіт, гашене вапно (для закислених субстратів). Після формування гряди зволожують і залишають для вистоювання на 4–6 діб.

Потім у гряди *вводять* дощових черв'яків. Заселення гряд проводиться простим перекиданням ящиків або контейнерів з матковою культурою у викопані на кожному квадратному метрі грядок ямки або безпосередньо на гряди, бажано в ранкові години. Для заселення використовуються молоді, але вже окільцовані статевозрілі черв'яки одного віку, здатні до відкладання коконів з заплідненими яйцями. Вони краще адаптуються до нових для них умов проживання і до зміни компостованого матеріалу. Використання особин одного віку в матковій культурі забезпечить вихід в кінці технологічного ланцюжка черв'яків одного віку і приблизно одного розміру, що спрощує відокремлення черв'яків від субстрату. У великих господарствах ведеться своя маткова культура, для підтримки якої витрачається до 30–50 % всіх витрат. За сприятливих умов маточна культура дає щомісяця до 2 кг молодих черв'яків з 1 м² робочої площі.

На *звикання* хробаків до нового субстрату йде 7–10 днів, про що судять із виявлення хробаків за межами старого субстрату, внесеного при засіві. Промислові лінії черв'яків, отриманих на основі вітчизняних рас з одним

циклом розвитку на рік, засівають наприкінці квітня – на початку травня. Щільність заселення на відкритих майданчиках коливається від 150 до 500 г (1500–5000 молодих особин) на кожен квадратний метр, у закритих опалювальних приміщеннях вона вища – до 2,5 кг/м².

Протягом перших трьох місяців черв'яки мають посилено харчуватися і розмножуватися. На добу вони споживають кількість корму, що дорівнює їх масі, при цьому їх маса подвоюється щотижня, тому необхідне періодичне підживлення популяції субстратом, що переробляється. Для стимулювання діяльності черв'яків і підтримки оптимальних умов проживання в підживлену суміш можуть додавати крейду, подрібнену глину, різні кормові добавки (барду, кавову гущу, продукти, що містять білок – молочний порошок, соєве борошно тощо). Якщо активність черв'яків нормальна, то перше підживлення проводять через місяць від початку вермикомпостування. Придатність підживлення для живлення черв'яків визначають завчасно в тест-аналізі на їх активність і виживання, що виконується протягом місяця в невеликих ящиках, в які засипають корм і поміщають кілька десятків черв'яків. Розроблено також методи експрес-тестування придатності субстратів для вермикультивування. Так, по одному з варіантів на поверхню проби підготовленого субстрату викладають кілька екземплярів черв'яків і спостерігають за їх поведінкою протягом 30 хв. Вважається, що якщо черв'яки поглиблюються в нього протягом 5–10 хв, то субстрат відповідає всім вимогам, необхідним для нормальної життєдіяльності черв'яків, якщо ж черв'яки розходяться по поверхні і не зариваються в нього, значить субстрат не придатний для хробаків і потребує подальшої підготовки. Хробаки звикають до компоста певного хімічного складу, і адаптацію до нового їм субстрату потрібен значний час, тому в технологічному процесі бажано забезпечувати постійний склад сировини.

При *підживленні* на поверхні гряд, де утворився перероблений шар, розкладають нові порції субстрату шаром 5–15 см. У теплий час шар має бути тоншим через небезпеку перегріву гряди. Надалі аналогічні підживлення проводять з періодичністю 1 раз на три-чотири тижні – для відкритих майданчиків і 1 раз на один-два тижні – для опалюваних приміщень. Останній догодовування хробаків під час культивування просто неба проводять наприкінці вересня – початку жовтня.

По ходу вермикомпостування гряди з черв'яками 2–3 рази на тиждень ворошать і поливають відстоєною водопровідною водою для підтримки оптимальної вологості та аерування гряди. У холодну пору гряди вкривають мішковиною. Полімерні плівки не використовують, оскільки гряди повинні добре провітрюватись.

Для боротьби з мишами та крітами використовують пастки, або сітчасте дно із загорнутими краями, але це здорожує виробництво. Для знищення мурах і багатоніжок можуть використовуватися піретроїдні препарати, для боротьби з міллю – препарати на основі сірки.

До кінця циклу розмноження в грядках-культиваторах популяція черв'яків зростає до 50–60 тис особин на кожному квадратному метрі, а висота гряди збільшується до 0,7–0,8 м. Вихід копролітів з 1 т вихідного матеріалу становить 550–600 кг (60 % вологості).

У *траншейній* технології матеріал, що переробляється, закладається в траншею довжиною 2–3 м, шириною 1,0–1,5 м і глибиною 0,5–1,0 м. Стіни траншеї викладаються дошками, будівельними блоками або іншим матеріалом. Для додаткової аерації всієї товщі субстрату можуть встановлювати аераційні труби з пористого або сітчастого матеріалу.

Недоліки траншейної технології – необхідність великих площ при низькому коефіцієнті використання робочого об'єму приміщень у закритому варіанті, складність підтримки оптимальних умов процесу через можливі пересихання або перезволоження субстрату, складність контролю за його компостуванням, можливість вимерзання вермикультури в траншеї та бурті в зимовий час.

У *ящикній* технології культивування та компостування проводяться на стелажах, контейнерах, лотках або касетах при температурі 20–22 °С. Для вермикультивування використовуються ящики або лотки глибиною 30–50 см із дерева, пластмаси, з дренажними отворами. Субстрат укладають на половину заповнення ящиків шаром 15–25 см, заселяють хробаками з розрахунку 10–15 тис. особин/м² і поміщають на стелажі або встановлюють у касети. Поверхні субстратів закривають технічним сукном або іншим повітропроникним матеріалом, щоб уникнути пересихання верхніх шарів. Також застосовуються стелажі з сітчастим дном із встановленими внизу піддонами, що полегшує збір вермикомпоста. Періодично, раз на 7–10 днів в ящики, лотки або стелажі додається нова порція вихідного субстрату, який шарується шаром в 5–10 см і зволожується. Наприкінці циклу культивування вони вивільнюються від вмісту, заповнюються новою порцією матеріалу, що переробляється, і заселяються матковою культурою дощових черв'яків.

Хоча ящикна технологія дозволяє підвищити коефіцієнт використання корисного обсягу приміщень, вона трудомістка, тому малоприматна для переробки значних кількостей відходів. Її використовують у лабораторіях і на дрібних підприємствах для виведення ліній черв'яків, підбору композицій субстратів та умов культивування та компостування, отримання маточних культур.

У всіх випадках вермикультивування та вермикомпостування у разі потреби черв'яків *відокремлюють від компосту*. Ця операція технологічно недостатньо відпрацьована. При механічному методі відокремлення можуть використовуватися вібраційні гуркити, сита або спеціальні пристрої, що є порожнистим циліндром з жорсткою щіткою на внутрішній поверхні. При обертанні його черви вичісуються з компосту. Недолік таких пристроїв – пошкодження хробаків. Для кращої сипкості та сепарованості субстрат із хробаками можуть підсушувати до 50–60 % вологості. Також апробовано світловий, тепловий та хімічний (за допомогою формаліну) методи впливу на черв'яків.

Найефективнішим методом видалення черв'яків з вермикомпосту вважається метод приманки. За означеним методом черв'яки витримуються на голодній пайці близько 3 тижнів, потім збоку або зверху насипається свіжий корм і проводиться дощування. Залучені черв'яки переповзають у свіжий корм, звільняючи готовий вермикомпост. Для виманювання хробаків з компосту як приманку доцільно використовувати і більш «смачний» для них корм: свіжий гній, торф, що розклався, або підданий компостуванню картон, яблучні очистки, барда, пастки з пахучими речовинами, що приваблюють хробаків.

Метод приманки реалізований, зокрема, у так званій технології безперервного кормового ланцюга. Для цього свіжий корм розміщують не на гряді, а зі зсувом убік. Хробаки мігрують у бік корму. Наступну порцію також додають зі зсувом убік, змушуючи, таким чином, хробаків безперервно рухатися по гряді. На шляху переміщення черв'яків встановлюють ємкості-пастки з приманкою. Хробаки накопичуються у таких ємностях. При цьому відпадає потреба у відокремленні їх від компосту.

Ефективність вермикомпостування та вермикультивування може бути підвищена за рахунок впровадження *високомеханізованих установок* з високою продуктивністю. Під час механізованої обробки для обслуговування господарства на 300–600 гряд досить двох-трьох осіб при 8-годинному робочому дні за наявності трактора з фронтальним навантажувачем, розкидачу гною, дощувальних установок, вантажного автомобіля. Також потрібний гуркіт для подрібнення субстрату, сівалки, автоматичне пакування мішків з біогумусом.

Існують автоматизовані системи вермикомпостування в *піддонах* та *касетах*. Однак з точки зору створення найбільш оптимальних умов середовища, досягнення максимальної продуктивності, механізації робіт, полегшення обслуговування процесу і контролю за ним, найбільш перспективними технологіями переробки субстратів за допомогою промислових біореакторів різної конструкції є такі: баштового типу,

горизонтальних барабанів, що обертаються, та ін. У реакторах подібного типу необхідно передбачати проведення процесу за оптимальної температури (20–25 °С), аерації, рівномірному зрошенні всієї товщі субстрату, що переробляється без утворення застійних анаеробних зон, систему дренажу та збору надлишку зрошуючої рідини, опорні елементи, що перешкоджають злежуванню субстрату, його злипанню та зависанню при розвантаженні, можливість проводити пошарове завантаження вермикультури та здійснювати постійний контроль за ходом процесу переробки та станом вермикультури, відокремлювати основну масу черв'яків від переробленого субстрату безпосередньо всередині реактора.

В установках *баштового типу* переробку різних відходів здійснюють у циліндричній або конусоподібній вежі. Корм безперервно подається зверху та вивантажується знизу. Перемішування та аерація відходів здійснюються за допомогою шнека. У нижню частину вежі повітря не надходить, там відбувається ущільнення компосту, а черв'яки переповзають в розташовані вище аеровані шари.

Приклад конструкції біореактора вертикального типу представлено на рис. 3.4. Біореактор включає три зони: зону завантаження, робочу зону та зону розвантаження. Зона завантаження складається з завантажувальної горловини. Робоча зона включає корпус реактора, пристрій аерації, розвантажувальні рамки. У зону розвантаження входять обичайка з похилим днищем, два люки: розвантажувальний і технологічний, привід руху аераційної труби. Корпус біореактора виготовлений з циліндричної обичайки з нержавіючої сталі заввишки 3,0 м та діаметром 1,8 м.

При висоті завантажувального шару понад 2,0 м у нижній частині установок вертикального типу в результаті ущільнення та злежуваності субстрату утворюються мертві зони, що характеризуються недостатнім надходженням повітря та розвитком анаеробних процесів розпаду органічних речовин завантаженого субстрату. Утворення мертвих зон сприяє накопиченню баласту, зниженню якості готового продукту, пригнічує зростання хробаків і навіть може призвести до повної загибелі під дією токсичних продуктів гниття в нижній частині установок. У конструкції біореактора, зображеної на рис. 3.4 для усунення можливості утворення застійних зон в центральній частині корпусу розташовується пристрій аерації у вигляді перфорованої труби з діаметром аераційних отворів 20 мм, а на аераційній трубі на відстані 1 м один від одного в горизонтальному напрямку закріплені розвантажувальні рамки. Розвантажувальні рамки необхідні для зниження тиску шарів субстрату і розпушування його під час руху аераційної труби. Рамки не надають пошкоджуючої дії на вермикультуру і не перешкоджають рівномірному

зрошенню всієї товщі субстрату.

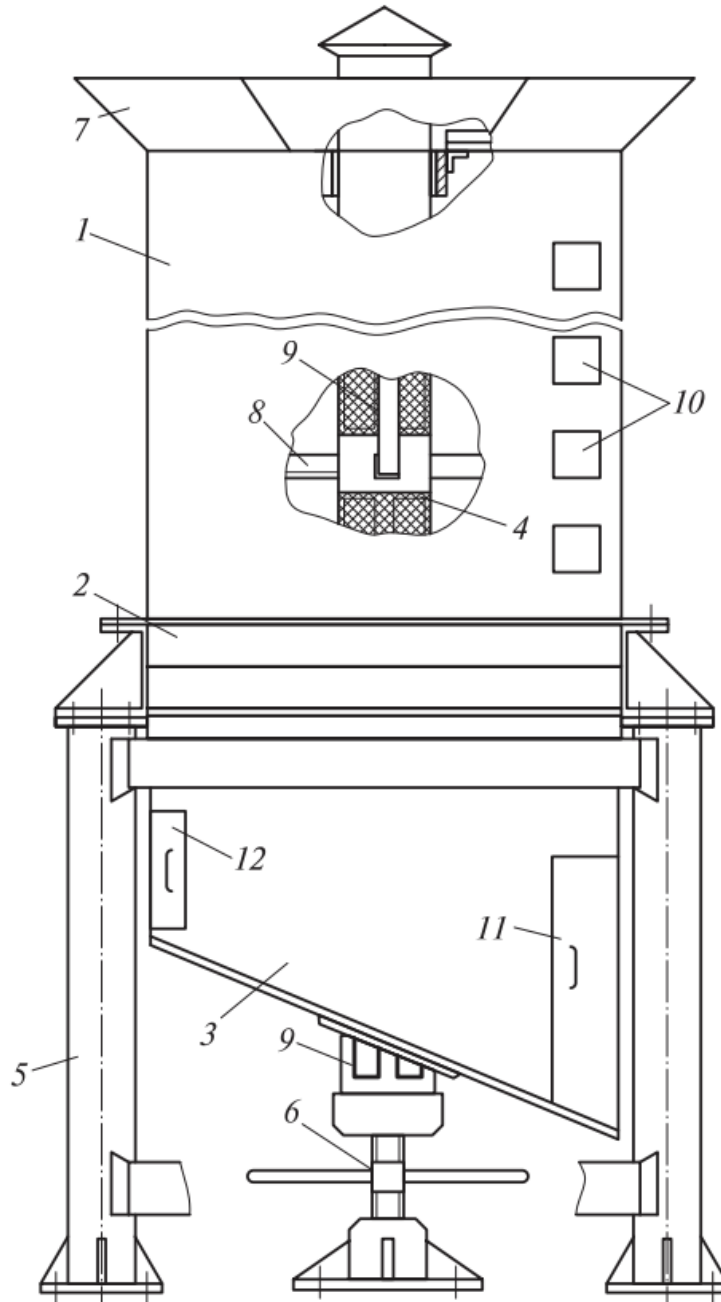


Рис. 3.4. Принципова схема конструкції реактора вермикультування: 1 – корпус реактора; 2 – розвантажувальний шибер; 3 – розвантажувальний відсік; 4 – аераційна труба; 5 – опори; 6 – привід руху аераційної труби; 7 – завантажувальна горловина; 8 – розвантажувальні елементи; 9 – аераційні отвори; 10 – оглядові вікна; 11 – розвантажувальний люк; 12 – технологічний люк

Вікна, розташовані на корпусі біореактора, необхідні для контролю надшарового завантаження вермикультури. Наявність технологічного люка в зоні розвантаження дозволяє контролювати ступінь деструкції відходів, оцінити якість готового продукту та встановити час завершення компостування.

Після закінчення процесу проводиться відділення готового продукту, що вивантажується, від свіжоприготовленого і завантаженого в біореактор субстрату за допомогою відсікових шиберів, виконаних у вигляді вил. Привід руху аераційної труби усуває зависання і прилипання субстрату при вивантаженні шляхом переміщення вгору-вниз аераційної труби.

Процеси розвантаження готового продукту і дозавантаження реактора свіжим субстратом розділені за часом, щоб дати можливість черв'якам переповзти у верхні шари субстрату. Після переходу роботи установки в циклічний режим операції дозавантаження і вивантаження повторюють періодично кожні 2 тижні.

У найбільш продуктивних вермиреакторах весь цикл вермикомпостування триває всього 7 днів, при цьому на площі 20 м² отримують 1 т біогумусу на добу. Вартість такого пристрою досить висока. Витрати на впровадження механізованої технології з використанням спеціалізованих промислових біореакторів окуповуються протягом двох років. Така типова технологічна лінія повинна включати операції сортування і змішування компонентів субстрату, що переробляється, ділянка підготовки маткової культури черв'яків, власне біореактор, сортування готового продукту, операцію відділення (вигонки) біомаси черв'яків, ділянка розфасовки біогумусу і біомаси. Маточна культура потрібна для підтримки оптимальної кількості біомаси в реакторах, а також на випадок порушення технологічних параметрів процесу загибелі популяції черв'яків.

Зберігають гумус у вологому, висушеному чи замороженому вигляді. Найменше вихідні властивості та показники якості, вміст рухомих форм хімічних елементів змінюються при зберіганні замороженого свіжого біогумусу. Зберігання біогумусу у вологому стані призводить до надмірної мінералізації органічної речовини біогумусу, а у висушеному вигляді – до інактивації ферментів поліфенолоксидаз, що сприяють синтезу гумінових речовин.

Питання з теми:

1. Дайте визначення поняттям вермикультивування та вермикомпостування. В чому різниця між ними?
2. Дайте визначення поняттю біогумус.
3. Назвіть особливості дощових хробаків як біологічних об'єктів культивування.
4. Якими є оптимальні умови життєдіяльності дощових хробаків?

5. Назвіть види дощових хробаків, придатні для вермикультивування та вермикомпостування. Перерахуйте їхні переваги і недоліки.

6. Опишіть властивості продуктів вермикультивування та вермикомпостування.

7. Опишіть застосування продуктів вермикультивування та вермикомпостування в Україні та світі.

8. Наведіть приблизний склад біогумусу, отриманого при переробці гною великої рогатої худоби за допомогою промислових ліній дощових черв'яків.

9. Які цінні характеристики для ремедіації забруднених, рекультивації та реабілітації виснажених ґрунтів має біогумус?

10. Опишіть спосіб проведення ремедіаційних заходів, що включає використання спеціалізованих мікроорганізмів і дощових черв'яків.

11. Наведіть основні умови використання дощових черв'яків у відкритому ґрунті.

12. На які групи можна поділити способи компостування за ступенем створення оптимальних умов?

13. Як можна класифікувати переробку органічних відходів за допомогою дощових черв'яків за методами культивування?

14. Опишіть основні етапи вермикультивування траншейним методом. Які недоліки та переваги має означена технологія?

15. Опишіть основні етапи вермикультивування ящичним методом. Які недоліки та переваги має означена технологія?

16. Якими способами можна відокремити дощових черв'яків від компосту?

17. Які є перспективні способи інтенсифікації процесів вермикомпостування та вермикультивування? Опишіть основні стадії таких технологій.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про відходи : Закон України від 1998 р. 187/98-ВР : станом на 16.10.2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 13.02.2023).
2. Класифікатор відходів. *ПроАгро Груп*. 2023. URL: <http://www.proagro.com.ua/reference/promua/kv/11280.html> (дата звернення: 13.02.2023).
3. Бригінець К. Д., Абашина К. О. Утилізація промислових відходів. Основи утилізації відходів : конспект лекцій. Харків :Харк. нац. акад. міськ. госп-ва, 2012. 58 с.
4. Щурська К. О., Кузьмінський Є. В. Біоенергетика. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 306 с.
5. Дубровін В. О., Голуб Г. А., Поліщук В. М., Сєра К. М. Біодизель та біоетанол. Київ, ЮНІДО, 2015. 52 с.
6. Шестопалов О. В., Бахарєва Г. Ю., Філенко О. М. та ін. Біологічна очистка та дезодорація газоповітряних викидів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2015. 116 с.
7. Швед О. В., Миколів О. Б., Комаровська-Порохнявець О. З., Новіков В. П. Екологічна біотехнологія. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 368 с.
8. Козар М. Ю., Зубченко Л. С. Екобіотехнологія та біоенергетика: навч. посіб. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 63 с.
9. Євчук Х. Управління відходами виробництва продукції сільського господарства як об'єкт економічної науки. *Проблеми системного підходу в економіці*, 2019. № 6 (74). С. 29–33.
10. Liu, Sh., Wang, Q., Li, Yu. & Ma X. Highly efficient oriented bioconversion of food waste to lactic acid in an open system: Microbial community analysis and biological carbon fixation evaluation. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 370, P. 128398. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128398.
11. Hui-Zhong, Sun, Xin-Yue, Chen, Yu-Miao, Zhang & Bin, Qiao. Construction of multi-strain microbial consortia producing amylase, serine and proline for enhanced bioconversion of food waste into lipopeptides. *Biochemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 188, P. 108682. doi.org/10.1016/j.bej.2022.108682.
12. Pedraza Torres, A. M., Sanchez-Hernandez, J. C. Bioconversion of hazardous organic wastes using invertebrates. Fate of Biological Contaminants

During Recycling of Organic Wastes. Ch. 15. 2023, P. 297–357. doi.org/10.1016/B978-0-323-95998-8.00007-8.

13. A review of the vermicomposting process of organic and inorganic waste in soils: Additives effects, bioconversion process, and recommendations. *Bioresource Technology Reports*. 2023. Vol. 21. 101332. doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101332.

14. Khondee, N., Ruamyat, N., Luepromchai, E., Sikhao, K., Hawangchu, Yo. Bioconversion of lignocellulosic wastes to zwitterionic biosurfactants by an alkaliphilic bacterium: Process development and product characterization. *Biomass and Bioenergy*. 2022. Vol. 165. 106568. doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106568.

15. Shan, Huang, Xin, Zheng, Lingxun, Luo & Yuemin, Ni. Biostimulants in bioconversion compost of organic waste: A novel booster in sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 319. 128704. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128704.

16. Workie, E., Kumar, V., Bhatnagar, A. & He, Yi. Advancing the bioconversion process of food waste into methane: A systematic review. *Waste Management*. 2023. Vol. 156. P. 187-197. doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.030.

17. Dharma Patria, R., Rehman, Sh., Vuppaladadiyam A. K. Bioconversion of food and lignocellulosic wastes employing sugar platform: A review of enzymatic hydrolysis and kinetics. *Bioresource Technology*, 2022. Vol. 352. 127083. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127083.

18. Bhujbal, S. K., Ghosh, P. Biotechnological potential of rumen microbiota for sustainable bioconversion of lignocellulosic waste to biofuels and value-added products. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 814. 152773. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152773.

19. Chavan, Sh., Yadav, B. Bioconversion of organic wastes into value-added products: A review. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 344, no B. 126398. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126398.

20. Gong, Ch., Cao, L. Genetic manipulation strategies for ethanol production from bioconversion of lignocellulose waste. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 352. 127105. doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127105.

21. Rachmadona, N., Harada, Yu. Integrated bioconversion process for biodiesel production utilizing waste from the palm oil industry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, Is. 3. 107550. doi.org/10.1016/j.jece.2022.107550.

22. Ariaeenejad, Sh., Kavousi, K. Efficient bioconversion of lignocellulosic waste by a novel computationally screened hyperthermostable enzyme from a

specialized microbiota. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023. Vol. 252. 114587. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114587.

23. Pourbayramian, R., Abdi-Benemar, H. Bioconversion of potato waste by rumen fluid from slaughterhouses to produce a potential feed additive rich in volatile fatty acids for farm animals. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280, P. 1. 124411. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124411.

24. Amalia, A. V. Bioconversion and valorization of cassava-based industrial wastes to bioethanol gel and its potential application as a clean cooking fuel. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021. Vol. 35. 102093. doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102093.

25. Yasin, N. M. Enhancing the biodegradation of (bio)plastic through pretreatments: A critical review. *Waste Management*. 2022. Vol. 150. P. 1-12. doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.004.

26. Kovalev, A. A. Biohydrogen production in the two-stage process of anaerobic bioconversion of organic matter of liquid organic waste with recirculation of digester effluent. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Is. 51. P. 26831-26839. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.124.

27. Niu, Ch., Cai, T., Lu, X. Nano zero-valent iron regulates the enrichment of organics-degrading and hydrogenotrophic microbes to stimulate methane bioconversion of waste activated sludge. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 418. 129511. doi.org/10.1016/j.cej.2021.129511.

28. Gonzalez, A., van Lier, Ju. B., de Kreuk, M. K. The role of growth media on composition, bioconversion and susceptibility for mild thermal pre-treatment of waste activated sludge. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 298. 113491. doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113491.

29. Bharathiraja, B. Critical review on bioconversion of winery wastes into value-added products. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 158. 112954. doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112954.

30. Moshood, T. D., Nawanir, G. Green product innovation: A means towards achieving global sustainable product within biodegradable plastic industry. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 363. 132506. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132506.

31. Ouyang, W., Liu, H., Murygina, V., Yu, Y., Xiu, Z., Kalyuzhnyi, S. Comparison of bio-augmentation and composting for remediation of oily sludge: A field-scale study in China. *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40(12), P. 3763–3768. doi:10.1016/j.procbio.2005.06.004.

32. Naujokiene, V., Sarauskis, E., Lekaviciene, K., Adamaviciene, A., Buragiene, S., Kriauciuniene, Z. The influence of biopreparations on the reduction of energy consumption and CO₂ emissions in shallow and deep soil tillage. *Science of the total environment*. 2018. Vol. 626, P. 1402-1413. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.
33. Friedrich, L., Kikuchi, Y., Matsuda, Y., Binder, U., Skerra, A. Efficient secretory production of proline/alanine/serine (PAS) biopolymers in *Corynebacterium glutamicum* yielding a monodisperse biological alternative to polyethylene glycol (PEG). 2022. *Microbial cell factories*. Vol. 21, Is. 1, no. 227. doi:10.1186/s12934-022-01948-5.
34. Tiso, T., Winter, B., Wei, R., Hee, J., de Witt, J., Wierckx, N., Quicker, P., Bornscheuer, U.T., Bardow, A., Nogales, J., Blank, L.M. The metabolic potential of plastics as biotechnological carbon sources. Review and targets for the future. *Metabolic engineering*. 2022. Vol. 71, P. 77-98. doi:10.1016/j.ymben.2021.12.006.
35. Curran, L. M., Pham, L. T., Sale, K. L., Simmons, B. A. Review of advances in the development of laccases for the valorization of lignin to enable the production of lignocellulosic biofuels and bioproducts. *Biotechnology advances*. 2022. Vol. 54, no. 107809. doi:10.1016/j.biotechadv.2021.107809.
36. Lynd, L. R., Beckham, G.T., Guss, A.M. & Jayakody, L.N. Toward low-cost biological and hybrid biological/catalytic conversion of cellulosic biomass to fuels. *Energy & environmental science*. 2022. Vol. 15, Is. 3, P. 938-990. doi:10.1039/d1ee02540f.
37. Pinheiro, L. R. S., Gradissimo, D. G., Xavier, L. P., Santos, A. V. Degradation of Azo Dyes: Bacterial Potential for Bioremediation. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Is. 3, no. 1510. doi:10.3390/su14031510.
38. Singh, H., Tomar, S., Qureshi, K. A. Recent Advances in Biomass Pretreatment Technologies for Biohydrogen Production. *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 3, no. 999. doi:10.3390/en15030999.
39. Makam, P., Yamijala, S. R., Bhadram, V.S., Shimon, L. J. Single amino acid bionanozyme for environmental remediation. *Nature communications*. 2022. Vol. 13, Is. 1, no. 1505. doi:10.1038/s41467-022-28942-0.
40. Kamarudin, S. H., Rayung, M., Abu, F. & Ahmad, S. A review on antimicrobial packaging from biodegradable polymer composites. *Polymers*. 2022. Vol. 14, Is. 1, no. 174. doi:10.3390/polym14010174.
41. Capanoglu, E., Nemli, E., Tomas-Barberan, F. Novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2022. Vol. 70, Is. 23, P. 6787-6804. doi:10.1021/acs.jafc.1c07104.

42. Sun, Z., Xi, J.Y., Yang, C.P., Cong, W.J. Quorum sensing regulation methods and their effects on biofilm in biological waste treatment systems: A review. *Frontiers of environmental science & engineering*. 2022. Vol. 16, Is. 7, no. 87. doi:10.1007/s11783-021-1495-2.
43. Wang, L. Research trends in Jiang-flavor baijiu fermentation: from fermentation microecology to environmental ecology. *Journal of food science*. 2022. Vol. 87, Is. 4, P. 1362-1374. doi:10.1111/1750-3841.16092.
44. Egan, J., Salmon, S. Strategies and progress in synthetic textile fiber biodegradability. *Springer Nature applied sciences*. 2021. Vol. 4, Is. 1, no. 22. doi:10.1007/s42452-021-04851-7.
45. Lopes, I. G., Yong, J.W., Lalander, C. Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste management*. 2022. Vol. 142. P. 65-76. doi:10.1016/j.wasman.2022.02.007
46. Kulkarni, K., Chadha, U., Yadav, S. & Tarun, D. M. Review-Latest trends and advancement in porous carbon for biowaste organization and utilization. *ECS Journal of solid state science and technology*. 2022. Vol. 11, Is. 1, no. 011003. doi:10.1149/2162-8777/ac438a.
47. Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., Tosi, S. Fungal enzymes involved in plastics biodegradation. *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, Is. 6, no. 1180. doi:10.3390/microorganisms10061180.
48. Martin, C., Dixit, P., Momayez, F., Joensson, L.J. Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic feedstocks to facilitate biochemical conversion. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2022. Vol. 10, no. 846592. doi:10.3389/fbioe.2022.846592.
49. Perman, E., Schnurer, A., Bjorn, A., Moestedt, J. Serial anaerobic digestion improves protein degradation and biogas production from mixed food waste. *Biomass & bioenergy*. 2022. Vol. 161, no. 106478. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106478.
50. Meloni, E., Martino, M., Iervolino, G. The route from green H₂ production through bioethanol reforming to CO₂ catalytic conversion: A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 7, no. 2383. doi:10.3390/en15072383.
51. Narisetty, V., Zhang, L., Zhang, J.X., Lin, C.S.K. Fermentative production of 2,3-Butanediol using bread waste - A green approach for sustainable management of food waste. *Bioresource technology*. 2022. Vol. 358, no. 127381. doi:10.1016/j.biortech.2022.127381.
52. Donkor, K.O., Gottumukkala, L.D., Lin, R.C., Murphy, J.D. A perspective

on the combination of alkali pre-treatment with bioaugmentation to improve biogas production from lignocellulose biomass. *Bioresource technology*. 2022. Vol. 351, no. 126950. doi:10.1016/j.biortech.2022.126950.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
ГЛАВА 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ.....	4
1.1 Відходи деревооброблюваної промисловості.....	5
1.2. Відходи сільського господарства.....	8
1.3. Відходи переробної промисловості.....	12
1.4 Відходи з очисних споруд.....	20
1.5 Тверді побутові відходи.....	28
1.6 Промислові відходи.....	29
Питання з теми.....	31
ГЛАВА 2. МІКРОБІОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ.....	33
2.1. Збагачення кормовим білком.....	33
2.1.1. Технологічні особливості мікробіологічної конверсії у кормовий білок.....	36
2.1.2. Виділення та концентрування біомаси та білкових речовин.....	53
2.1.3. Техніко-хімічний контроль та забезпечення якості продукції...	60
2.1.4. Принципи організації маловідходного виробництва.....	64
2.1.5. Особливості мікробіологічної переробки в кормові продукти деяких відходів.....	67
2.2. Силосування.....	79
2.3. Компостування.....	88
2.4. Аеробна стабілізація.....	101
2.5. Анаеробне зброджування та метаногенерація.....	102
2.6. Біоконверсія в теплову енергію та паливо.....	105
2.7. Біодобрива та біоінтенсивне землеробство.....	124
2.8. Біодеструкція рослинних полімерів та матеріалів.....	134
2.9. Біодеградація синтетичних полімерних матеріалів та використання біодегратованих пластиків.....	140
2.10. Складування та поховання твердих відходів.....	156
Питання з теми.....	162
ГЛАВА 3. ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯ І ВЕРМИКОМПОСТУВАННЯ.....	167
3.1. Особливості дощових хробаків як біологічних об'єктів культивування.....	169
3.2. Властивості продуктів та застосування вермикультивування та вермикомпостування.....	174
3.3. Технологічні основи вермикультивування та верми- компостування.....	183
Питання з теми.....	190
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	192

Навчальне видання

Навчальний посібник
БІОКОНВЕРСІЯ ВІДХОДІВ

Укладачі:

БЄЛІНСЬКА Анна Павлівна
БЛИЗНЮК Ольга Миколаївна
МАСАЛІТІНА Наталія Юріївна
МИРОНЕНКО Лілія Сергіївна

Відповідальний за випуск *О. М. Близнюк*

В авторській редакції