НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 631.372-027.45

ПОГОДЖЕНО
Декан механіко-технологічного факультету
Вячеслав БРАТІШКО
(підпис) (ім'я, прізвище)
2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.І.Момотенка
(назва кафедри)
Іван РОГОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)
2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування параметрів та режимів роботи обладнання для твердофазної ферментації рослинної сировини

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Освітня програма «Агроінженерія»
(назва)

Орієнтація освітньої програми
(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ім'я, прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ім'я, прізвище)

Виконав: _____ Богдан МАРЧЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П.Момотенка

д.т.н., проф. _____ **Іван РОГОВСЬКИЙ**
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я, прізвище)

_____ р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Богдану Сергійовичу МАРЧЕНКУ
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Освітня програма «Агроінженерія»
(назва)

Орієнтація освітньої програми (освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи *Обґрунтування параметрів та режимів роботи* затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» грудня 2022 р. № 1943 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Науково – технічна література; результати науково-дослідних робіт по літературних джерелах гальмівних властивостей АТЗ за умови безпечності сільськогосподарських транспортних робіт

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Аналіз конструкції пристроїв та процесів твердофазної ферментації біомаси у закритих камерах

Математичне моделювання параметрів процесу змішування компонентів у субстраті та закритій камері бродіння

3. Результати дослідження параметрів процесу змішування компонентів у субстраті та закритій камері бродіння

4. Результати дослідження енергетичних параметрів закритої бродильної камери

Перелік графічного матеріалу Електронна презентація на 14 слайдах

Дата видачі завдання «11» листопада 2022 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Наталія ЦИВЕНКОВА
(підпис) (ім'я прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Богдан МАРЧЕНКО
(підпис) (ім'я прізвище)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ ТВЕРДОФАЗНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ

1.1 Аналіз конструкції обладнання і процесів твердофазної ферментації

1.2 Аналіз досліджень аналітичного опису процесів ферментації

1.3 Висновки

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ

2.1 Математичне моделювання параметрів процесу змішування компонентів у субстраті та параметрів закритої камери

2.2 Математичне моделювання енергетичних параметрів закритої

2.3 Математичне моделювання енергетичних параметрів закритої

2.4 Висновки

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ

3.1 Результати дослідження параметрів процесу змішування компонентів у субстраті та параметрів закритої камери

3.2 Висновки

3.3 Результати дослідження енергетичних параметрів закритої

3.4 Висновки

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

НУБіП України

РОЗДІЛ 4. Розвиток галузі виробництва біопалива як детермінанта економічного зростання та соціального добробуту: світовий досвід та перспективи для України 71

Висновки до розділу 4 71

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ 71

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 71

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Конструктивні успіхи в проектуванні обладнання для виробництва компостів та ґрунтовне вивчення технології їх виробництва з біосировини свідчать про приділення даному питанню значної уваги з боку сучасної технічної думки [3]. Однак, існує низка технічних питань, які, через відсутність належного математичного обґрунтування, підтвердженого результатами експериментів, не дозволяють отримувати очікуваних результатів від застосування зазначеної технології [1, 24].

Одним з суттєвих недоліків процесу компостування біосировини є низька ефективність [4, 9]. Недостатньо розкритими залишаються і питання підвищення ефективності процесу виробництва компостів шляхом забезпечення максимально можливої рівномірності змішування компонентів у субстраті із збереженням мікробіологічних параметрів субстрату [23, 24].

Тому актуальним є питання розробки технічних засобів та обґрунтування технічних та технологічних параметрів процесу змішування компонентів у субстраті з метою досягнення максимальної рівномірності змішування. Це дозволить отримувати компости високої якості за мікробіологічними показниками та підвищити ефективність процесу компостування [25, 28].

Метою роботи є визначення впливу параметрів камери та процесу на рівномірність змішування частинок компонентів у субстраті. Це забезпечить можливість підвищення ефективності виробництва.

Завдання роботи:

- виконати аналіз теоретичних положень та результатівекспериментальних досліджень процесу змішування компонентів субстратів в закритих камерах та встановити параметри, які впливають на рівномірністьпроцесу змішування;
- визначити залежність величини лінійної швидкості руху частинок субстрату, при якій спостерігається повне розосередження матеріалу по вільній поверхні сегменту субстрату та залежних від неї технологічних,

конструкційних і кінематичних параметрів камери;

- експериментально дослідити вплив кутової швидкості камери та вологості субстрату на величину лінійної швидкості руху частинок субстрату, від якої залежить рівномірність змішування компонентів субстрату;
- виконати енергетичний аналіз процесу компостування біосировини в закритих камерах ферментації.

Предмет дослідження – технологічний процес виробництва компостів із біосировини.

Об'єкт дослідження – закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи закритої камери ферментації на ефективність виробництва компостів.

Методи дослідження. Аналітичні дослідження виконувалися у відповідності до класичних положень теорії ймовірності та математичної статистики, теорії експерименту, математичного моделювання, програмування. Експериментальні дослідження проводились з використанням експериментальної установки Поліського національного університету згідно з галузевими стандартами і у відповідності до прийнятої методики із застосуванням відповідного вимірювального обладнання.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено дослідний зразок камери ферментації, який може слугувати прототипом до промислового зразка обладнання для виробництва компостів;

– обґрунтовано параметри камери та процесу ферментації, при яких досягається максимальна рівномірність змішування компонентів у субстраті.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

РОЗДІЛ. 1
АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ ТВЕРДОФАЗНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ БІОМАСИ В ЗАКРИТИХ КАМЕРАХ

1.1. Розвиток біоенергетики як інноваційний орієнтир у контексті енергетичної безпеки України

Обмеженість ресурсів викопних джерел енергії та їх екологічна небезпека викликають необхідність у пошуку джерел енергії, які б могли їх замінити. Водночас, в процесі сільськогосподарського виробництва залишаються відходи, які при їх переробці можна конвертувати в біопалива. Шляхом створення в сільському господарстві системи виробництва і використання біопалива можна частково замінити викопні ресурси і забезпечити енергетичну автономність виробничої та житлово-побутової сфер сільськогосподарського підприємства. Це дозволить зменшити енергетичне навантаження на все народне господарство України. Сировина для виробництва біопалива в умовах сільськогосподарського підприємства частково буде вирощуватися на орних землях (наприклад, олійні культури для виробництва біодизеля). Однак, головним чином, в якості сировини використовуватимуться відходи рільництва (для виробництва теплової енергії та твердих біопалива), тваринництва та переробних підприємств, які створюватимуться в господарстві для переробки сільськогосподарської продукції (для виробництва біогазу). Використання відходів в якості сировини для виробництва біопалива вирішить проблему їх утилізації та зменшить собівартість отриманих енергетичних ресурсів. Створена система виробництва і використання біопалива в умовах сільськогосподарського підприємства, крім енергетичної автономності і збільшення прибутковості самого підприємства, дозволить частково вирішити також проблему зайнятості населення та відтоку трудових ресурсів із сільської місцевості.

Важливу роль у створенні системи виробництва і використання біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва відіграє її техніко-технологічне забезпечення. Україна знаходиться на початковому етапі створення такої

системи, тоді як у розвинутих країнах дана система або її елементи вже впроваджені, під неї розроблено техніко-технологічне забезпечення. Звичайно, можна піти шляхом закупівлі готових технологій і технічних засобів. Однак, зважаючи на їх високу вартість, термін окупності інвестицій буде значний. Тому на основі аналізу існуючого техніко-технологічного забезпечення, шляхом проведення теоретичних і експериментальних досліджень, розроблення методичного забезпечення, доцільно розробляти власні технології та технічні засоби виробництва і використання біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва. Вирішення даної народногосподарської проблеми неможливе без вирішення науково-технічної проблеми, суть якої полягає в розробленні моделей і методів техніко-технологічного обґрунтування системи виробництва і використання біопалива у сільському господарстві.

Енергетика є особливою сферою економіки завдяки її технологічній специфіці, що визначається фізичною складністю перебігу процесів виробництва, розподілу та споживання енергетичних ресурсів, особливостями побудови галузі (високою капітало- та матеріалоємністю енергетичних об'єктів, тривалими термінами побудови й експлуатації), тісними взаємозв'язками з іншими галузями, а також високим ступенем залежності добувних, переробних, виробничих та транспортних процесів від рівня їх енергозабезпечення.

На початку XXI ст. у світі сформувалося сучасне бачення місії енергетики, що полягає у максимально ефективному використанні природних паливно-енергетичних ресурсів та потенціалу енергетичного сектору задля зростання світової економіки, а також підвищення якості життя населення планети. Відтак у провідних країнах сформувалась нова енергетична стратегія, основними критеріями якої є енергоефективність; сталість, інтелектуальні енергетичні системи, що побудовані відповідно до концепції Smart Grid; децентралізація енергетики; відновлювальні джерела енергії.

Проблема гарантування енергетичної безпеки України набула актуальності у зв'язку з поступовим вичерпанням основних паливно-енергетичних ресурсів, що, у свою чергу, спричинило ескалацію геополітичних конфліктів у спробах

посилення контролю над видобутком, розподілом і транспортуванням паливно-енергетичних ресурсів. Тому для посилення енергонезалежності України важливою складовою є розвиток біоенергетики, що сприятиме ефективному використанню потенціалу країни задля досягнення економічного, соціального та екологічного ефектів.

З огляду на важливість розвитку біоенергетики як важливої складової забезпечення енергетичної безпеки України, перспективам розвитку даного напрямку енергетики присвячено праці визначних науковців. Зокрема, Г.М. Калетнік [4, 70] досліджує вплив виробництва біопалив з біомаси на енергетику, навколишнє середовище та продовольчу безпеку держави. Г.І. Гелетуха та Т.А. Железна відзначають, що Україна має значний потенціал для розвитку біоенергетики. У їхніх дослідженнях зазначено, що через неповне врахування цінності потенціалу вторинних ресурсів, низький рівень обізнаності та неналежний маркетинг, недооцінку соціальних та екологічних факторів значна частина агровідходів, які можна використовувати як матеріальні та енергетичні ресурси, втрачається. Проте недостатньо висвітленими залишаються питання прогнозів щодо перспектив розвитку біопалив із агробіомаси та факторів, які на це впливають.

Потреби в енергії визначаються наступними факторами: збільшенням чисельності населення, транспортних засобів та засобів виробництва; поліпшенням якості життя, що супроводжується збільшенням обсягів споживання енергії (опалення, охолодження, освітлення, використання різноманітних приладів); науково-технічним розвитком виробничих процесів [5].

Рівень розвитку енергетичного сектору будь-якої країни визначально впливає на стан її економіки, темпи економічного зростання, стан довкілля, розв’язання соціальних проблем та рівень життя населення. Тому фундамент енергетичної безпеки та незалежності завжди пов’язаний з національною безпекою держави.

Задля визначення сутності поняття «енергетична безпека» вважаємо за

необхідне насамперед розкрити сутність використовуваних у вітчизняній та зарубіжній нормативно-правовій і науковій літературі дефініцій (рис. 1.1).

Енергетична безпека

Організація Об`єднаних Націй – «енергетична безпека» – це безперервна наявність енергії у різноманітних формах, у достатній кількості та за доступними цінами.

Міжнародне енергетичне агентство – «енергетична безпека» – це безперебійна наявність джерел енергії за доступною ціною.

Енергетична Стратегія України на період до 2035 р. – «енергетична безпека» – це невід'ємна складова економічної і національної безпеки, необхідна умова існування і розвитку держави. Гарантування енергетичної безпеки – це досягнення стану технічно надійного, стабільного, економічно ефективного та екологічно прийнятного забезпечення енергетичними ресурсами економіки і соціальної сфери країни, а також створення умов для формування і реалізації політики захисту національних інтересів у сфері енергетики.

Методика розрахунку рівня економічної безпеки України – «енергетична безпека» – це такий стан економіки, який забезпечує захищеність національних інтересів у енергетичній сфері від наявних і потенційних загроз внутрішнього та зовнішнього характеру, дає змогу задовольняти реальні потреби в паливно-енергетичних ресурсах для забезпечення життєдіяльності населення та надійного функціонування національної економіки в режимах звичайного, надзвичайного та воєнного стану.

Ковалко М.П. – «енергетична безпека» – це одна із найважливіших складових економічної безпеки, що проявляється, по-перше, як стан забезпечення держави паливно-енергетичними ресурсами, які гарантують її повноцінну життєдіяльність, і, по-друге, як стан безпеки енергетичного комплексу та здатність енергетики забезпечити нормальне функціонування економіки, енергетичну незалежність країни.

Шидловський А.К., Виганасенко С.І., Ворохов Л.П. – «енергетична безпека» – це стан забезпечення держави паливно-енергетичними ресурсами, що гарантують її повноцінну життєдіяльність; стан безпеки енергетичного комплексу та здатність енергетики забезпечити нормальне функціонування економіки, енергетичну незалежність країн.

Микитенко В.В. – «система енергетичної безпеки країни» – це поєднання економічного, політичного, техніко-технологічного, ресурсного і, власне, енергетичного, а також факторів наукового, географічного, організаційного, управлінського тощо, без урахування яких аналіз будь-якої безпеки неможливий.

Авторське визначення:
«Енергетична безпека» – забезпеченість енергетичної сфери енергетичними ресурсами у необхідних кількостях за доступною ціною, що дає змогу задовольняти потреби в паливно-енергетичних ресурсах для забезпечення життєдіяльності населення та національної економіки.

Рис. 1.1 Узагальнення підходів до визначення терміну «енергетична безпека» у працях зарубіжних та українських вчених

За даними Міжнародного Енергетичного Агентства [7], енергетична безпека може розглядатись у довгостроковому та короткостроковому аспекті.

Довгострокова енергетична безпека головним чином пов'язана з своєчасними інвестиціями в енергопостачання відповідно до економічного розвитку і екологічних потреб. З іншого боку, короткострокова енергетична безпека фокусується на здатності енергетичної системи швидко реагувати на раптові зміни в балансі попиту та пропозиції [8]. Існує багато факторів, що впливають на формування енергетичної безпеки. Характеристика основних складових енергетичної безпеки наведена на рис. 1.2.

Диверсифікація енергетичних виробничих потужностей	Посилення енергетичної незалежності від країн-імпортерів паливно-енергетичних ресурсів, стабільність цін на енергетичні ресурси;
Цінове регулювання	Енергетичні ресурси мають бути доступними для споживачів;
Рівень інвестицій у сферу енергетики	Значні інвестиції потрібні для задоволення прогнозного зростання попиту на енергоресурси, і наявність цих інвестицій може бути проблематичною для країн, що розвиваються;
Концентрація постачальників	Залежність від імпортного палива від невеликої кількості постачальників збільшує ризик несприятливого впливу на ринок;
Наявність інфраструктурних експертиз	Країни повинні мати доступ до різних джерел енергії для досягнення різноманітного поєднання енергоносіїв;
Можливість заміни палива	Диверсифікація використання палив може мати важливе значення для енергетичної безпеки;
Політичні загрози	Система енергопостачання може бути вразливою до перебоїв, викликаних політичними інтересами та терористичними атаками.

Рис. 1.2. Складові системи енергетичної безпеки

Зважаючи на викладене, досягнення енергетичної безпеки неможливе без виявлення чинників, дія яких може негативно позначитися на розвитку паливно-енергетичного комплексу. Узагальнення загроз енергетичній безпеці України наведено на рис. 1.3.

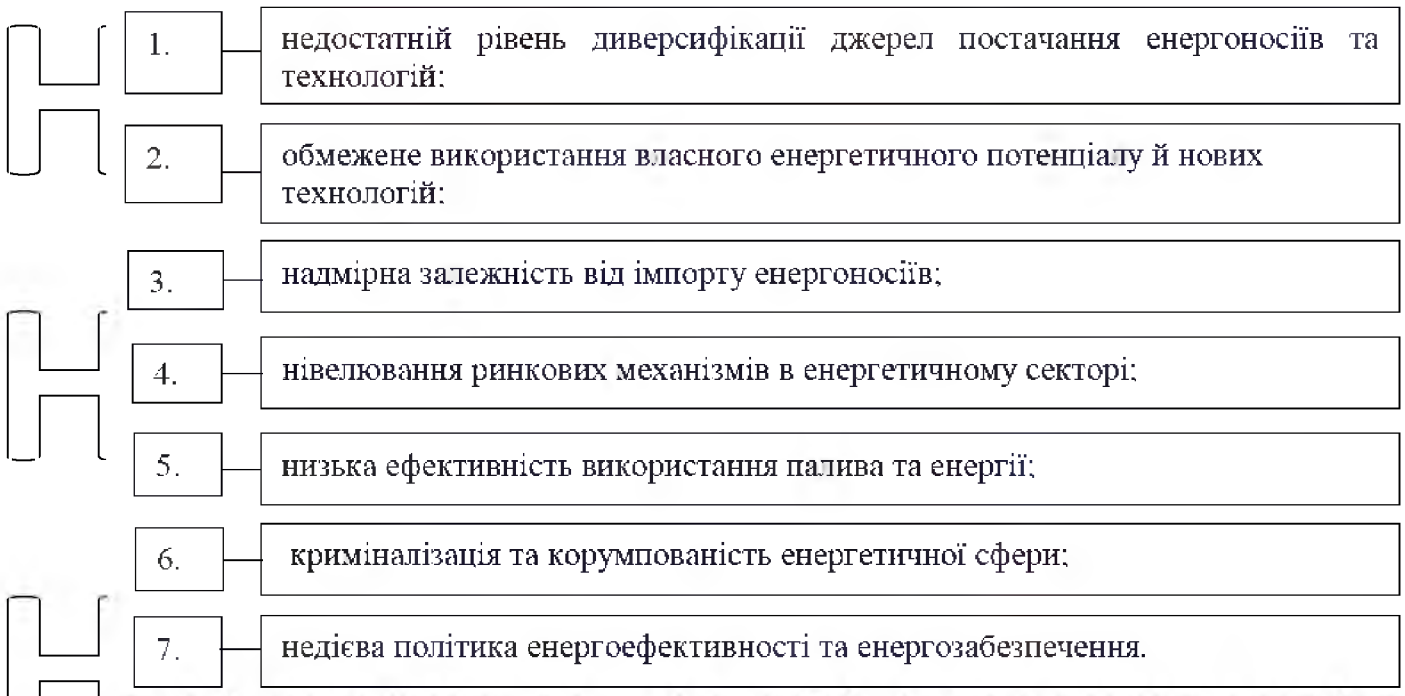


Рис. 1.3. Фактори, що загрожують енергетичній безпеці України

Згідно з Наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України «Про затвердження Методичних рекомендацій щодо розрахунку рівня економічної безпеки України» № 1277 від 29.10.2013 [40] до основних індикаторів енергетичної безпеки в Українській законодавчій базі відносять такі: частку власних джерел у балансі паливно-енергетичних ресурсів держави; рівень імпортної залежності за домінуючим ресурсом у загальному постачанні первинної енергії; частку імпорту палива з однієї країни (компанії) у загальному обсязі його імпорту; зношеність основних виробничих фондів підприємств паливно-енергетичного комплексу;енергоємність ВВП; відношення інвестицій у підприємства паливно- енергетичного комплексу до валового внутрішнього продукту; запаси природного газу; запаси кам'яного вугілля; частку відновлювальних джерел у загальному постачанні первинної енергії; частку втрат при транспортуванніта розподіленні енергії.

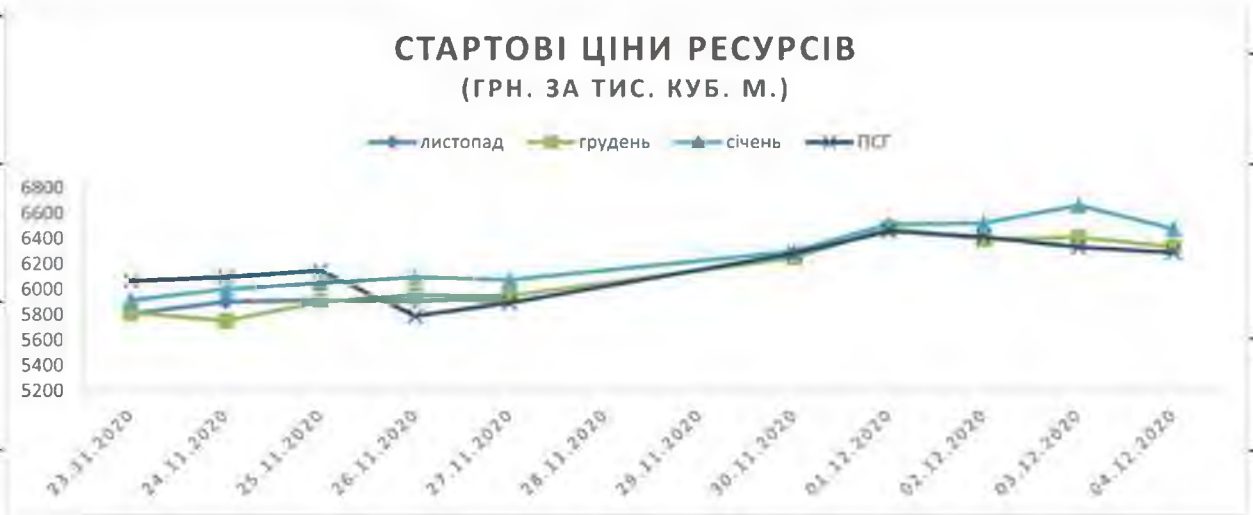
Донедавна в Україні у контексті державної економічної політики особлива увага зосереджувалась на понятті «енергозбереження». Водночас передові країни світу фокусують увагу на більш глобальному підході, а саме «енергоефективність», що включає у себе складові екологічності та

конкурентоспроможності.

1.2. Сучасний стан і перспективи подальшого розвитку біоенергетики в Україні

Енергетична безпека України суттєво залежить від ступеня диверсифікованості енергоносіїв та обсягів використання імпортованих палив. Тому скорочення споживання природного газу та широке впровадження відновлюваних джерел енергії є актуальними задачами, що стоять сьогодні перед країною.

На сьогодні основним паливом в Україні залишається природний газ – його частка в структурі споживання первинних енергоносіїв складає близько 40%. При цьому, за рахунок власних запасів Україна забезпечує себе газом лише на 35%, тоді як 65% необхідного обсягу приходиться імпортувати, в першу чергу, з росії. До того ж вартість природного газу з 2005 року постійно зростає (рис.). На вугілля припадає 28% загального споживання первинних енергоносіїв, на нафту та нафтопродукти – 12%, на атомну енергію – 18%. Внесок відновлюваних джерел енергії до енергобалансу становить 2,5%, у тому числі великої гідроенергетики – 2%. З біомаси виробляється лише близько 0,5% загального обсягу енергії (рис. 1.4).



НУБіП України

Рис 1.4 Ріст оптової ціни природного газу на кордоні України

Серед усіх відновлюваних джерел енергії біомаса є найбільш перспективним джерелом, оскільки, по-перше, Україна має великі її запаси, доступні для енергетичного використання; по-друге, її застосування як палива призводить до прямого заміщення природного газу.

Оцінка, виконана фахівцями Інституту технічної теплофізики НАН України, показує, що економічно доцільний потенціал біомаси становить близько 30 млн. т у. п. /рік, що може задовольнити до 18% потреби України у первинній енергії. Основними складовими потенціалу є відходи сільського господарства та енергетичні культури. При цьому сільськогосподарські відходи є реальною складовою, яку можна сьогодні використовувати для виробництва енергії. Енергетичні культури представляють зараз «віртуальну» частину потенціалу, оскільки їх вирощування в Україні обмежується зараз кількома дослідними та експериментальними плантаціями. Виробництво енергетичних культур на промисловому та комерційному рівні ще не розпочалося, але загальна тенденція показує, що швидкого розвитку цього напрямку можна очікувати вже в найближчому майбутньому.

Однією із суттєвих переваг біомаси є її відносна дешевизна порівняно з традиційними паливами, у першу чергу, з природним газом. Вартість більшості видів твердих біопалив у перерахунку на одиницю енергії (ГДж) суттєво менша вартості природного газу для промислових споживачів. Деревні гранули

найдорожчі серед твердих біопалив, навіть дорожчі за природний газ для житлово-комунального господарства і населення. Це можна пояснити тим фактом, що ціна природного газу для цих категорій споживачів штучно занижена порівняно з ринковим рівнем.

За існуючих цін на викопні палива, теплову енергію та біомасу впровадження котлів на біомасі для виробництва теплової енергії є економічно доцільним і може рекомендуватися сьогодні практично для всіх об'єктів теплоенергетики, тобто в бюджетному, комунальному та промисловому секторах. Термін окупності проектів із впровадження котлів на деревині та соломі – близько двох років. Відносно низькі ціни на природний газ для населення і житлово-комунального господарства є основною перешкодою для широкого застосування біомаси як палива в цих секторах.

Згідно з виконаними оцінками, ємність ринку України для впровадження котлів на біомасі становить 57100 одиниць загальною встановленою потужністю 8180 МВт. Введення в експлуатацію цього обладнання призведе до заміщення 4,8 млрд. $м^3$/рік природного газу. Вартість заміщеного газу становить 12,8 млрд. грн. (за ціни 2638 грн. /1000 $м^3$). Вартість біомаси, необхідної для роботи біоенергетичного обладнання, – 2,6 млрд. грн. (за середньої ціни 200 грн./т). Тоді сумарна річна економія коштів завдяки заміщенню природного газу біомасою становить 12,8 – 2,6 = 10,2 млрд. грн., що у 1,8 раза більше величини загальних інвестиційних витрат, необхідних на впровадження запропонованого парку котлів. Важливо, що ця економія коштів повторюватиметься з року в рік.

На сьогодні в Україні працюють близько 20 котлів на тюкованій соломі потужністю до 1 МВт, встановлених, переважно, у сільських школах та на сільськогосподарських підприємствах. Більше 1,5 тис. котлів потужністю понад 100 кВт виробляють теплову енергію з деревної біомаси. З них близько тисячі – це досить старі котли самостійно переведені підприємствами лісової та деревообробної галузей з вугілля та мазуту на спалювання деревних відходів. У перспективі їх доцільно замінити на сучасні деревоспалюючі котли з більш високим ККД та суттєво кращими показниками по емісії шкідливих речовин.

У секторі електроенергії з біомаси ситуація змінюється на краще після введення нового порядку розрахунку «зеленого» тарифу на електроенергію, вироблену з відновлюваних джерел енергії. Цей порядок розрахунку висвітлений у Законі України «Про внесення змін до Закону України «Про електроенергетику» щодо стимулювання використання альтернативних джерел енергії» (від 01.04.2009 № 1220-VI) та Постанові НКРЕ «Про затвердження змін до Порядку встановлення, перегляду та припинення дії «зеленого» тарифу для суб'єктів господарської діяльності» (від 16.07.2009 № 828).

З урахуванням впливу «зеленого» тарифу, на період до 2020 р. можна рекомендувати впровадження такого обладнання для виробництва електроенергії з біомаси: міні-ТЕЦ на деревині, міні-ТЕЦ на соломі, когенераційні установки на біогазі з гною та інших відходів сільського господарства, міні-електростанції на біогазі з полігонів твердих побутових відходів.

Україна має добрі передумови та достатній потенціал для динамічного розвитку сектора біоенергетики. Основними рушійними силами цього процесу є постійний ріст цін на традиційні енергоносії та наявність великого потенціалу біомаси, доступної для енергетичного використання. Діючий закон про біопалива та закон щодо «зеленого» тарифу сприяють впровадженню біоенергетичних технологій для виробництва теплової та електричної енергії.

Ефективність процесу розвитку біоенергетики в Україні суттєво залежить від координованості робіт у цьому секторі та правильного вибору пріоритетів. Вважаємо, що на урядовому рівні має бути визначений єдиний державний орган, який би займався всіма питаннями в біоенергетичному секторі і координував роботу інших причетних організацій та установ. Пріоритетні напрямки розвитку мають бути визначені у державній програмі розвитку біоенергетики в Україні при забезпеченні її фінансування. Подальші вдосконалення необхідні також у чинному законодавстві, щодо стимулювання виробництва та споживання біопалив та щодо «зеленого» тарифу. Додатково в законодавчому порядку пропонуємо звільнити біопалива від НДВ та ввести державну субсидію

покупцям біоенергетичного обладнання у розмірі 20% від його вартості. Одним з суттєвих бар'єрів на шляху розвитку сектора біоенергетики в Україні є перекіс цін на природний газ для різних категорій споживачів. Штучно занижена ціна на газ для населення та житлово-комунального господарства робить практично неможливим впровадження біоенергетичних технологій у побутовому та житлово-комунальному секторах.

Національні цілі із внеску біомаси до загального споживанняпервинних енергоносіїв мають бути зафіксовані в офіційному документі, наприклад такому як План дій по біомасі. Вважаємо за реально досяжні такі показники: 2020 р. – 1% (що еквівалентно споживанню близько 2 млн. т у. п.), 2020 р. – 5%, 2030 р. – до 10%.

Одним із напрямків розвитку виробництва біопалива в Україні є реалізація заходів відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [3].

Основними завданнями виконання Нової енергетичної стратегії України є проведення реформування енергетичних компаній відповідно до зобов'язань України у межах Договору про заснування Енергетичного Співтовариства, збільшення видобутку природного газу, зниження рівня енергоємності ВВП та подальший розвиток відновлюваних джерел енергії [3]. Прогнозна структура постачання енергії в Україні, відповідно до Енергетичної стратегії України, наведена на рис. 1.4.

Стратегію розроблено з урахуванням тенденцій геополітичного, макроекономічного, соціального і науково-технічного розвитку країн, яким притаманні певні ризики у напрямку визначення цих факторів. Зважаючи на це, важливим є забезпечення постійного моніторингу Енергетичної стратегії, а також регулярне уточнення запланованих стратегією обсягів та термінів реалізації робіт з урахуванням зміни цін на паливно-енергетичні ресурси в Україні та світі, досягнень науково-технічного прогресу, державних програм, удосконалення нормативно-правового регулювання. Основні напрямки розвитку енергетичної стратегії наведені на рис.1.4.

Рис. 1.4. Прогнозна структура постачання енергії в Україні у 2035 році

Отже, реалізація державної енергетичної програми дозволить забезпечити розвиток енергозберігаючих технологій та знизити енергозалежність. Водночас це сприятиме підвищенню екологізації виробництва та розвитку біоенергетики. Це пояснюють тим, що у аграрному секторі процес виробництва тісно пов'язаний із живими організмами: рослини і тварини, біологічні процеси, які протікають за певними законами природи і об'єктивно вимагають пристосування окремих технологічних процесів до ритму природи, що визначає необхідність врахування особливостей певних видів природних ресурсів, у тому числі біоенергетичних. Таким чином, розвиток біоенергетики є вагомим напрямом на шляху до підвищення конкурентних переваг вітчизняної економіки і збереження навколишнього середовища, що формує можливості до забезпечення зрівноваженості розвитку галузі.

Для України участь в Енергетичному Співтоваристві сприяє запровадженню на внутрішньому ринку більшої конкуренції, європейських технічних стандартів і прозорих правил регулювання, поліпшення інвестиційного клімату. Це сприяє поліпшенню інтеграції українського енергетичного сектору до ринків країн-членів ЄС, посиленню енергетичної безпеки України. Перевагою членства в Енергетичному Співтоваристві є додаткові можливості для країн-членів у залученні міжнародних кредитів та технічної допомоги.

Згідно з Дохійською поправкою, яку прийнято 09.12.2012 р. до Кіотського протоколу, Україні дозволено у другому періоді зобов'язань Кіотського протоколу на 2013–2020 рр. не перевищувати 76% викидів парникових газів від рівня 1990 р. до 2020 р [83]. Від імені Уряду України у 2009 р. було заявлено, що країна не перевищуватиме 50% викидів парникових газів у 2050 р. від рівня 1990 р. [19].

Важливим кроком на шляху до розвитку альтернативної енергетики в Україні було прийняття у 2008 р. Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо встановлення «зеленого» тарифу» № 601- VI від 25.09.2008 (закон втратив чинність від 01.07.2019) [37].

Україною 22.04.2016 р. підписано Паризьку угоду (COP21) та ратифіковано Законом України № 1469-VIII від 14.07.2016 «Про ратифікацію Паризької угоди щодо боротьби зі зміною клімату» [45].

Відповідно до положень Паризької угоди, кожна сторона самостійно визначає на національному рівні та подає в Секретаріат РКЗК ООН індивідуальний набір цілей – Очікуваних національно визначених внесків (ОНВВ) у сфері протидії зміні клімату, фіксуючи їх в якості своїх міжнародних зобов'язань [45].

До 2030 р. Україна поставила за мету не перевищувати значення 60% від рівня викидів парникових газів 1990 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 16.09.2015 р. № 980-р Про схвалення Очікуваного національно визначеного внеску України до проєкту нової глобальної кліматичної угоди), тобто знизити викиди парникових газів на 40%. Період впровадження Угоди з 01.01.2021 р. по 31.12.2030 р.

Особи, органи та інститути, що здійснюють державне управління у сфері охорони навколишнього природного середовища в Україні, наведено на рис. 1.26. Урядова політика у напрямку окремих секторів економіки, які продукують найбільшу кількість викидів парникових газів (наприклад, енергетичний сектор, промисловість тощо) формується відповідними профільними відомствами.

наліз конструкції обладнання і процесів твердофазноїферментації біомаси в закритих камерах

Камери ферментації закритого типу широко використовуються не лише для виробництва компостів, а також в хімічній, харчовій, фармацевтичній, гірничо-збагачувальній та інших галузях промисловості [7, 33]. Основною функцією зазначених камер є змішування речовин з різною питомою вагою, гранулометричним складом та фізико-хімічними властивостями [32].

Порівняно з іншими видами машин для виробництва компостів закриті камери ферментації мають широке застосування завдяки можливості забезпечувати задану рівномірність змішування компонентів субстрату. До їх переваг слід віднести: високу продуктивність, збереження властивостей компоиентів субстрату, мінімальне енергоспоживання, низький рівень шумупри роботі, простоту експлуатації і монтажу [9, 21, 22].

Режими руху частинок субстратів в закритих камерах мають значнийвплив на реалізацію технологічних процесів та енергоємність приводних установок. Моделювання кінематичних параметрів таких режимів руху становить інтерес при дослідженні ефективності різних роторних систем. Дана проблема є досить складною і це сприяє удосконаленню традиційних та пошукунових аналітичних та експериментальних методів її дослідження [20].

За [19] кількісною характеристикою закінченості процесу змішування є ступінь однорідності субстрату. Тобто масове відношення вмісту контрольного компоненту в пробі, що аналізується, до вмісту того ж компоненту в ідеальному субстраті, виражене у відсотках або в долях одиниці. На практиці субстрати складаються з частинок різних розмірів, форм, неоднакових за щільністю та фізико-хімічними властивостями (гній, солома, торф, листя дерев, пташиний послід тощо), тому процес протікає повільніше і менш стабільно.

У роботі [10] шляхом моделювання описано рух частинок несферичної форми, які мають, в порівнянні з частинками сферичної форми, більш сильні взаємозв'язки і, відповідно, низьку сипучість та більший кут ухилу, але дослідженню впливу частоти обертання на перемішування не приділено уваги.

В роботі [5] методом дискретних елементів досліджено вплив форми частинок матеріалу, частоти обертання камери ферментації та шорсткості торцевих стінок коротких камер на ступінь змішування. Встановлено, що для коротких камер величина ефективної площі контакту матеріалу зі стінками барабану має більший вплив на якість змішування компонентів матеріалу в порівнянні зі швидкістю обертання. При чому чим більша довжина камери, тим нижчий ступінь тертя компонентів матеріалу об торцеві стінки.

В [11] досліджено вплив частоти обертання камери та співвідношення торцевих та бокових сторін камери на осьову дисперсію матеріалу. Доведено, що співвідношення сторін обертової камери майже не змінює величину осьової дисперсії матеріалу на відміну від частоти обертання камери. Чим вища частота обертання ферментаційної камери, тим нижче значення осьової дисперсії.

Проте, отримані результати в [2, 8, 26] характерні для перемішування сухих матеріалів. Під час компостування органічних матеріалів певний вплив на характер взаємодії стінки камери із матеріалом буде вносити вологість. Тому використання отриманих результатів при компостуванні органічних матеріалів потребує уточнення та врахування вологості матеріалу, як змінного фактору. Також під час дослідження параметрів процесу руху частинок складових субстрату в камері потрібно врахувати вплив вологості на коефіцієнт тертя частинок субстрату по криволінійній поверхні лопатей камери.

У дослідженні [2] продемонстровано практичне застосування методу дискретних елементів під час моделювання реальних промислових процесів. У роботі виконано аналіз перемішування різних комбінацій бінарних сумішей, які змінювались за щільністю та розмірам. Відсутність в дослідженнях впливу інших змінних фізико-механічних властивостей матеріалів на параметри перемішування ускладнює застосування отриманих результатів у практичних виробничих задачах перемішування органічних матеріалів.

Дослідження параметрів руху частинок матеріалу в обертових камерах також представлено чисельними алгоритмами [18, 27]. В роботах [18, 27] для дослідження поведінки розподілу швидкостей та зони заповнення частинками

НУБіП України

матеріалу барабану використано алгоритм молекулярної динаміки [17] та метод кінцевих елементів із еластичною моделлю Мора-Кулона [15]. Моделювання здійснювалося в середовищі програм PLAXIS 3D та SCAD Office.

Для опису картини заповнення камери в залежності від зміни кутової швидкості та ступеня заповнення використано багатофазну модель методу обчислювальної гідродинаміки [22]. Для визначення руху заповненняматеріалом повільно обертової камери використано багатомасштабну модель методу скінчених елементів [26]. В роботі [26] також представлені переваги даного методу в порівнянні з методом дискретних елементів.

Однак дані методи не набули широкого застосування, оскільки точність чисельних розрахунків суттєво обмежена через наперед невизначені початкові умови та нефізичну природу граничних умов [16]. Отримані в роботах [16–26] результати характерні для роботи ферментаційних обертових змішувачів без лопаток та при змішуванні матеріалів, які мають визначений гранулометричний склад компонентів суміші. Застосування отриманих моделей для опису процесу перемішування органічного компосту буде призводити до суттєвих відхилень отриманих результатів.

З огляду на зазначене, виникає потреба у теоретичному та експериментальному обґрунтуванні конструкційних та кінематичних параметрів камер ферментації закритого типу для забезпечення рівномірного змішування компонентів у субстратах з органічної сировини.

1.4. Аналіз досліджень аналітичного опису процесів ферментації біомаси в закритих камерах

Важливі завдання, при вирішенні яких застосовують моделювання – це дослідження і розробка нових процесів і проектування нових виробництв, оптимізація конструкцій апаратів і технологічних схем, розробка методів керування процесами біоконверсії та їх автоматизація. Існує два підходи до моделювання процесів біоконверсії: фізико-хімічне та математичне [16].

Фізико-хімічне моделювання дозволяє дослідити процеси, суть яких мало вивчена, здійснювати на моделях значну кількість вимірювань, які неможливо

здійснити в звичайних умовах, потребує менших витрат і є менш небезпечним для навколишнього середовища порівняно з промисловими експериментами.

З метою оптимізації наявних та розробки нових процесів біоконверсії лише фізико-хімічного моделювання недостатньо, необхідно створювати математичні моделі, в основу яких покладені знання про взаємозв'язок значної кількості фізико-хімічних, біохімічних і мікробіологічних факторів. Математична модель цієї складної системи повинна включати опис різних природних об'єктів і явищ: клітин і їх популяцій; їх взаємодію з параметрами культивування; хімічні перетвореннння; масообмінні, гідродинамічні та теплообмінні процеси, можливість керування процесом тощо [12–14].

Поєднанням результатів, отриманих при фізико-хімічному та математичному моделюванні, а також використанням методів оптимізації (динамічного програмування, нелінійного програмування, варіаційного обчислення) вдається домогтися побудови відносної близькості моделей до процесів, що відбуваються в дійсності [29]. Нижче наведено декілька найбільш поширених моделей для окремого випадку процесу біоконверсії сировини – аеробної твердофазної ферментації в закритих камерах.

Термодинамічне моделювання. Одним з показників, який свідчить про готовність продукту аеробної твердофазної ферментації, є рівень споживання мікроорганізмами кисню – респірометрична активність, яка оцінюється шляхом аналізу температурних кривих, одержуваних під час ферментативних перетворень. Температурні криві відображають теплоенергетичні зміни в субстраті в часі. В роботі [31] запропоновано рівняння теплоенергетичного балансу для процесу аеробної твердофазної ферментації в закритих камерах:

$$m = m_m + m_{o.c.} + m_{H_2O.} \quad (1.1)$$

Оскільки суміш, яка перебуває в камері, обмінюється з навколишнім середовищем як масою, так і енергією, то досліджувана система може бути віднесена до відкритих. Поділивши складові рівняння теплоенергетичного балансу на добуток $m_{o.c.}$, отримуємо рівняння швидкості зміни температури в часі, град/год. [34, 35]:

Якщо температура до кінця ферментації рівна T_2, тоді площа під кривою рівна $dT/dt=0$, і після інтегрування рівняння (1.3) за часом маємо:

Можуть бути визначені за даними для вихідних сумішей і отриманих продуктів, S_c знаходять графічно. Певною складністю є визначення коефіцієнтів k і $f_{o.c.}$, оскільки перший коефіцієнт несе в собі інформацію щодо матеріалів, які використовуються в якості технологічного оточення, а другий – визначає кількість води, яка утворюється під час деградації 1 кг суміші, і може бути знайдений лише шляхом проведення додаткових експериментів [34, 35].

Отже, запропонована термодинамічна модель, яка описує процес аеробної твердофазної ферментації біосировини в закритих камерах і включає фізико-хімічний і математичний підходи, дозволяє задовільно оцінити ступінь готовності вироблених компостів. Слід відмітити, що більша частина термодинамічних моделей процесу конверсії біомаси в закритих камерах, які наявні в літературі, базується на подібних положеннях [17, 19, 30].

Кінетичне моделювання. Основним завданням біокінетики є дослідження молекулярних механізмів, що визначають динаміку біологічних процесів. Для визначення механізмів біоконверсії виконують кінетичний експеримент з вимірювання концентрації однієї з речовин з плином часу і залежно від ряду найбільш інформативних параметрів (температури, вологості, пористості, pH).

Результатом кінетичного дослідження є кінетичні криві, які відображають якісні зміни концентрації речовин, що відбуваються під час біоконверсії. Кількісний опис змін можна зробити за допомогою диференціальних та інтегральних кривих. За [35] в основі значної кількості кінетичних моделей процесів ферментації лежить припущення про періодичне збільшення клітинних популяцій, при якому в камеру на протязі всього процесу нічого не додається і з неї нічого не виділяється (за винятком газів). Для типового періодичного процесу (in vitro) кількість живих клітин змінюється в часі. На кривій росту можна виділити ряд основних перехідних станів – фаз [11, 35]: лаг-фаза; фаза експоненціального росту, стаціонарна фаза та фаза відмирання культури. Найчастіше для фази відмирання характерним є експоненціальне зменшення

чисельності мікроорганізмів.

Збільшення кількості клітин за період лаг-фази може бути описано рівнянням dx/dt=μx, де x – кількість клітин, μ – питома швидкість росту, t – час. При цьому x=x0 при t=tlag. Отже, швидкість зростання кількості клітин пропорційна кількості клітин. Інтегруючи це рівняння, отримуємо:

$$\ln(x/x_0) = \mu(-t_{lag});\ t_{lag} < x = x_0 \cdot e^{\mu(-t_{lag})} \quad (1.2)$$

Експоненціальне зростання закінчується, коли одна з важливих змінних процесу (наприклад, концентрація поживної речовини –лімітуючого субстрату або токсину) досягає рівня, при якому відсутнє подальше зростання клітин. Залежність швидкості росту клітинної культури від концентрації лімітуючого субстрату може бути описана рівнянням Моно [11]:

$$\mu = \mu_m \cdot \chi/(K_\chi + \chi) \quad (1.3)$$

За вказаними припущеннями будуються моделі біосинтезу або біодеградації тих чи інших органічних сполук в процесі ферментації. Багато з відомих моделей базуються на системах рівнянь на основі модифікацій рівняння Моно. Рівняння Моно-Гольдані, описує інгібування субстрату [11]:

$$\mu = \mu_m \cdot \chi/\left(K_\chi + \chi + \chi^2/K_i\right) \quad (1.4)$$

Інгібування росту продуктами біоперетворень описується рівнянням [11]:

$$\mu = \mu_m \cdot \chi \cdot K_p/(K_\chi + \chi) \cdot (K_p + P) \quad (1.5)$$

Однак, такий підхід не завжди є правильним, оскільки моделі, в основу яких покладено рівняння (1.6), не дозволяють здійснити адекватний опис при різних початкових концентраціях біомаси і субстрату, які змінюються в широких діапазонах, що є характерним для процесу аеробної твердофазної ферментації [6]. Отже, слід знайти нову, більш стаціонарну основу для моделей,які одночасно

враховуватимуть стохастичность і різні види гетерогенностей.

1.5. Висновки до розділу 1

нергетична безпека залишається одним із вагомих елементів економічної безпеки, що гарантує сталий розвиток економік кожної країни. Першочерговими завданнями у напрямку посилення енергетичної безпеки України є підвищення енергетичної ефективності, впровадження інноваційних енергоощадних технологій, розвиток виробництва та використання поновлюваних джерел енергії. Без диверсифікації вітчизняного паливно- енергетичного сектору та впровадження енергозберігаючих технологій Україна й надалі залежатиме від імпорту нафти й газу, втрачаючи значні валютні резерви. Важливим державним завданням має стати поліпшення системи управління галузями паливно-енергетичного комплексу та процесом енергозбереження.

наліз конструкцій камер і процесів конверсії біосировини в закритих камерах свідчить, що процеси аеробної твердофазної ферментації, реалізовані різними способами, поряд з масштабними розробками в різних галузях знань, мають безліч невирішених завдань. Особливу увагу слід звернути на пошук нових, нетрадиційних компонентів субстратів, на виявлення математичних залежностей параметрів процесу ферментації та обладнання для його реалізації від складу і властивостей вихідних сумішей і режимів роботи камер.

Гранична простота конструкції обертових закритих камер ферментації поєднується із вкрай складною для опису поведінкою середовища, що обробляється. Відомі термодинамічні та кінетичні моделі не повністю описують складний рух компонентів у субстраті під дією відцентрового силового та гравітаційного полів, що значно ускладнює рівномірність перемішування цих компонентів та здійснення моделювання робочих характеристик. Відсутність загальноприйнятої методики прогнозування поведінки заповнення субстратом закритої камери ферментації суттєво обмежує ефективність реалізації технологічних процесів при застосуванні цього обладнання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ У СУБСТРАТІ З ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ

2.1. Понятійний апарат формування біоенергетичного потенціалу енергетичних культур та відходів

На даному етапі економічного розвитку суспільства існують декілька актуальних завдань: продовольча, енергетична та екологічна безпека. Їх забезпечення потребує найбільш ефективного збалансування продовольчих, сировинних та енергетичних потреб.

Україна лише частково забезпечує себе власними енергоресурсами і змушена імпортувати більше 40% енергоносіїв. Сучасна енергетична політика України є загрозливою для соціально-економічного розвитку держави,оскільки ціни на енергоресурси щороку зростають, і ця тенденція посилюватиметься, адже видобуток викопних джерел енергії є нестабільним, іу найближчій перспективі запаси цих енергоносіїв як в Україні, так і у світі будуть вичерпані.

Зважаючи на це, освоєння нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії (НВДЕ) в Україні потрібно розцінювати як невід'ємну складову підвищення рівня енергетичної безпеки, а також зниження антропогенного впливу енергетики на навколишнє середовище. Незважаючи на свою залежність від імпорту енергоресурсів, Україна мало приділяє уваги розвиткуНВДЕ, частка яких в структурі енергоспоживання становить близько 1%, що значно менше, порівняно з іншими європейськими країнами.

Стратегічною метою України є інтеграція до ЄС, тому розвиток біоенергетики має особливо важливе значення, оскільки використання відновлювальних джерел енергії на рівні, що є не нижче середньоєвропейського, одна з вимог Європейського Союзу, які ставляться докраїн-членів. Цей факт є додатковим аргументом на користь розвитку відновлювальних джерел енергії.

Важливою складовою біоенергетичного сектору ЄС є енергетичні культури та відходи аграрних підприємств. З огляду на аграрну спрямованість

економіки України серед НВДЕ, найбільш швидкими темпами здатна розвиватись біоенергетика. Реалізація енергетичних та екологічних пріоритетів щодо розвитку біоенергетики в Україні може бути одним із вагомих засобів зміцнення енергетичної безпеки держави.

Як зазначають О.М. Шпичак і О.В. Бондар [100], незалежно від рівня економічного і соціального розвитку суспільства перед людиною завжди стоїть глобальна проблема енергетичного забезпечення власної життєдіяльності. Це стосується забезпечення, насамперед, продовольчими ресурсами і ресурсами для опалення, освітлення та пального для здійснення перевезень тощо [100].

Генезис поняття «біоенергетика» і його розуміння в економічній науці вперше було введено у 1956 р. лауреатом Нобелівської премії з фізіології та медицини Сент-Дьєрді А. у його науковій роботі «Біоенергетика» при вивченні функціонування живих організмів та їх енергозабезпеченні [86].

Вважаємо, що вживання префікса «біо» у термінах «біоенергетика» та «біоенергетичні культури» дуже вдале, оскільки саме тут відображається сутність процесів, що знаходяться в основі технологій утворення цього виду енергії, її біопоходження.

Сутнісну першооснову біоенергетики (біомаси та похідних від неї) на планеті Земля становить наявність біологічних процесів перетворення сонячної енергії в органічні речовини за участю фотосинтезу як на суходолі, так і у водоймах [100]. Структурна схема процесу перетворення сонячної енергії у біосфері та місце, яке в ньому посідає біоенергетика, наведено на рис. 2.1.

Дослідниками різних галузей наук поняття «біоенергетика» трактується по-різному. За твердженнями Г.Г. Гелетухи, Т.А. Желєзної [11], М.В. Дубініної [20], біоенергетикою в більшості випадків вважають діяльність, пов'язану з використанням біомаси, під якою, у свою чергу, розуміють вуглецевомістку відновлювану органічну речовину. У технічному значенні біоенергетика розглядається як галузь енергетики, яка базується навиробництві джерел енергії з біомаси за рахунок її технічної переробки.

НУБіП України

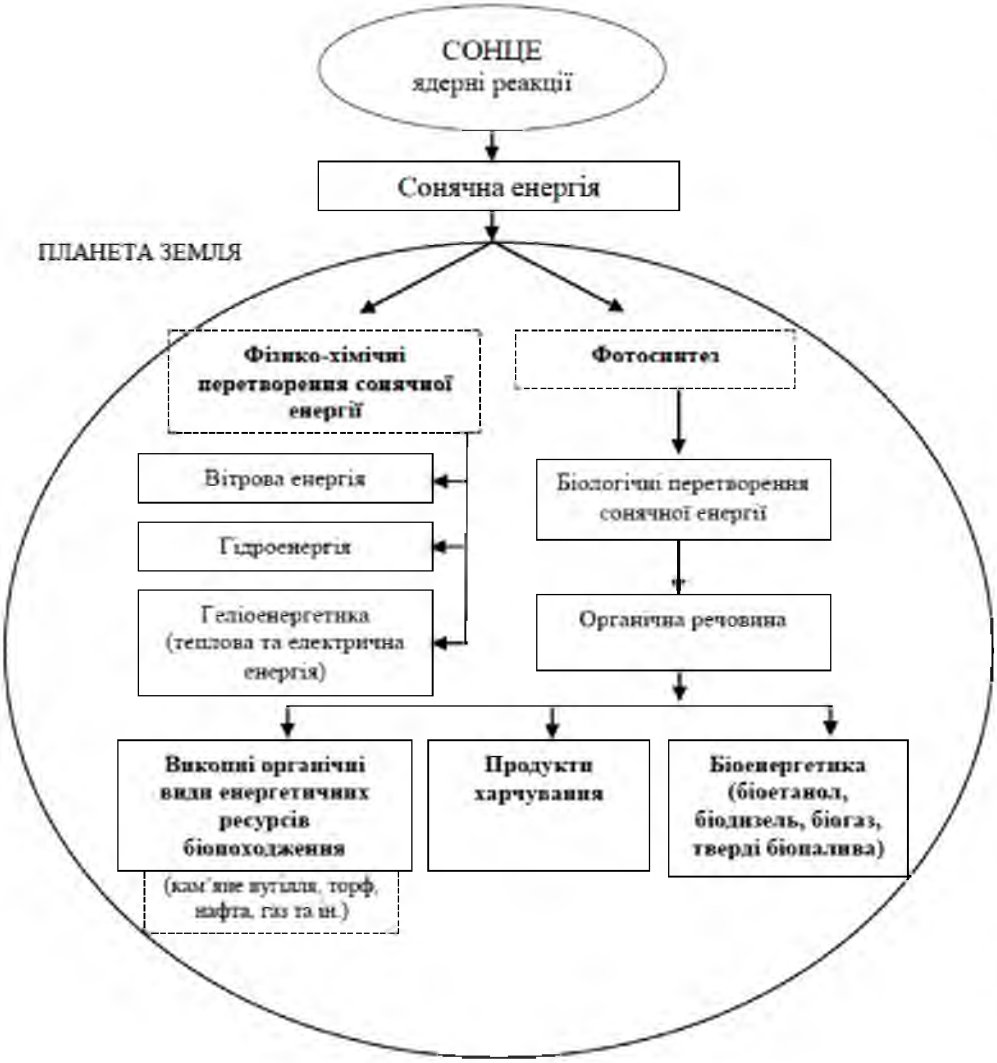


Рис. 2.1. Структурна схема біоенергетичних та фізико-хімічних процесіву системі перетворення і акумуляції сонячної енергії на планеті Земля

М.В. Роїк та О.О. Ягольник визначають поняття «біоенергетика» як міждисциплінарну еколого-орієнтовану галузь науки й аграрно-промислового комплексу, до якої входять суб'єкти науки й господарювання, діяльність котрих пов'язана з вирощуванням біоенергетичних культур, переробкою біосировини (біомаса рослинного й тваринного походження та інших біологічно активних зовнішніх джерел альтернативної енергетики, у т.ч. швидкоростучі енергетичні культури, залишки переробки деревини, лузга, лушпиння, солома, очерет, тріски, ферментні препарати, біомаса водоростей, послід, гній, відходи органічного й побутово-виробничого походження табудь-якої іншої поновлюваної сировини біологічного походження та її похідних) – в різні види біопалив, зберіганням,

транспортуванням, збутом чи продажем біопродуктів – біопалив із використанням об'єктів, що належать на правах власності чи на інших, передбачених законом підставах суб'єктам біоенергетики або іншим особам [33].

Міжурядова група з питань зміни клімату визначає біоенергію як відновлювану форму енергії [21]. Міжнародне енергетичне агентствовизначає біоенергію як найважливіше джерело відновлюваної енергії на сьогодні [24].

Управління з енергоефективності та відновлюваних джерел енергії США надає наступне визначення поняття «біоенергетика»: це форма відновлюваної енергії, що генерується з нещодавно отриманих органічних матеріалів, відомихяк біомаса, які можна використовувати для виробництва палива для транспорту,тепла, електроенергії та інших шляхів. Це один з безлічі різноманітних ресурсів, доступних для задоволення наших потреб в енергії [125].

За даними Управління сталої енергетики Ірландії, біоенергія – це форма відновлюваної енергії, що генерується при спалюванні палива з біомаси. Паливо з біомаси отримується з органічних матеріалів, таких як залишки врожаю, енергетичні культури та органічні відходи з приватних будинків, підприємств та ферм [126].

Агентство з відновлюваних джерел енергії Австралії розглядає біоенергетику як форму відновлюваної енергії, в якій використовуються органічні поновлювані матеріали (відомі як біомаса) для виробництва тепла, електроенергії, біогазу та рідкого палива. Найбільш економічно ефективними та екологічно сприятливими джерелами біомаси зазвичай є стічні води, побутові відходи і потоки відходів сільськогосподарського, лісового і промислового секторів.

Зауважимо, що поняття «біоенергетика» в українському законодавстві доволі стисло описано через Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: біоенергетика – це галузь енергетики, заснована на використанні біопалива, яке виробляється з біомаси [47].

Ми пропонуємо наступне визначення поняття: «біоенергетика» – це форма відновлюваної енергії, яку отримують з сільськогосподарських культур, відходів

рослинництва, тваринництва та інших органічних матеріалів, яку можна використовувати як біопаливо.

Оскільки поширеним є трактування біоенергії як енергії, що отримана з біомаси, розглянемо підходи до визначення цього поняття.

Відповідно до Закону України «Про альтернативні види палива» [62], біомаса – невикопна біологічно відновлювана речовина органічного походження, здатна до біологічного розкладу, у вигляді продуктів, відходів та залишків лісового та сільського господарства (рослинництва і тваринництва), рибного господарства і технологічно пов'язаних з ними галузей промисловості, а також складова промислових або побутових відходів, здатна до біологічного розкладу [62].

Схоже визначення поняття «біомаса» дає Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: біомаса – біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи сільського господаретва (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів [47].

Американське управління енергетичної інформації визначає біомасу як поновлюваний органічний матеріал, що походить із рослин і тварин [127].

Відповідно до Директиви 2009/28/ЄС Європейського Парламенту таРади від 23 квітня 2009 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел, біомаса розглядається як «біодеградовані фракції продуктів, відходів і залишків біологічного походження від сільського господарства (включаючи речовини рослинного і тваринного походження), лісового господарства та суміжних галузей, включаючи рибальство та водне господарство, а також біодеградована фракція промислових і муніципальних відходів» [108]. Слід зазначити, що види біомаси відрізняються між собою якза хімічними, так і за фізичними характеристиками, мають широкий спектр застосування, який визначається різноманітністю видів палива, що з неї отримують. Джерелом біомаси можуть бути сільськогосподарські культури, які мають високу

теплотворну здатність, багаторічні рослини, а також сільськогосподарські та лісогосподарські відходи. В науковій літературі визначають чотири типи біомаси (рис. 2.2).

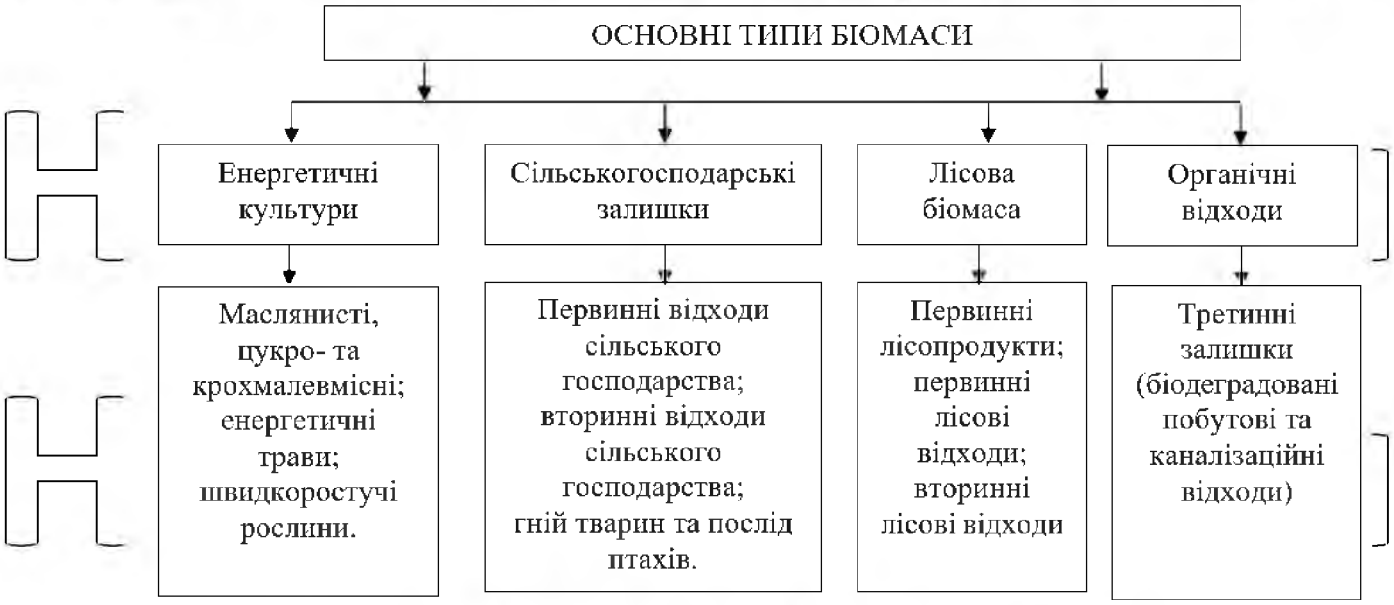


Рис. 2.2 Структура типів біомаси

У науковій літературі поняття «енергетичні рослини» ототожнюють з поняттям «біоенергетичні культури». Дослідники з Університету Штату Огайо Р. Лемус та Р.Лал визначають біоенергетичні культури як будь-які рослини, що використовується для виробництва біоенергії [117].

Згідно із визначенням Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, енергетичні культури – це рослини, які вирощують спеціально для того, щоб у майбутньому використати їх як паливо (біоенергетичне паливо). Такі культури використовуються для отримання твердих, рідких і газоподібних біопалив [47].

Рис. 2.3 Концепція складових біоенергетичного потенціалу

Енергетичними рослинами європейської кліматичної зони вважаються однорічні рослини з високим вмістом цукру та крохмалю (зернові, картопля, буряки, кукурудза на зерно), що використовуються для виробництва етанолу; олійні (ріпак, соняшник, олійний льон), з яких виробляють рослинну олію, а також багаторічні трави: міскантус великий, топінамбур, мальва пенсільванська та інші, деякі сорти трав [4].

Разом із вирощуванням сільськогосподарських культур при переробці, зберіганні, підготовці до продажу продукції утворюється значна кількість відходів, які загрожують екологічній безпеці держави. Проблема ефективного поводження з відходами має глобальний характер, тому повинна застосовуватись не лише до конкретного підприємства чи виробничого циклу, але й у масштабах всієї країни та світу.

2.2. Математичне моделювання параметрів процесу змішування

компонентів у субстраті та параметрів закритої камери ферментації

У відповідності з геометричними параметрами та прийнятою схемою роботи камери, частинки субстрату всередині камери послідовно проходять наступні стадії переміщення. На початку руху частинки субстрату переміщуються в напрямку руху камери. Потім спостерігається скочування частинок по вільній поверхні матеріалу субстрату, що піднімається. Наступною стадією є рух частинок по радіальній лопаті після її виходу із заповненої субстратом камери з подальшим вільним падінням часточок після сходження з лопатей. В залежності від місця знаходження кожної окремої частинкиматеріалу в певний момент часу, вона має різні траєкторії руху [2, 5, 8].

Щоб компоненти рівномірно розподілялися по поверхні завалу субстрату падаючим потоком потрібно щоб частинки, які сходять з радіальної лопаті останніми, в точці контакту з обичайкою барабана досягали межі завалу. Ця умова виконується при певних кінематичних параметрах.

Початкова швидкість руху субстрату з біомаси при вільному падінні в незаповненому просторі камери ферментації визначається швидкістю, яку часточка набуває при стіканні з лопатки, а також частотою, з якою камера обертається [11, 35].

Траєкторія руху частинок субстрату при падінні може бути представлена:

$$\begin{cases} x = (x-b)cos\beta - V_0 \cdot cos(\varsigma_0 \cdot t_{xy}) \\ y = (x-b)sin\beta - V_0 \cdot sin(\varsigma_0 \cdot {t_{xy}}^2 \cdot g/2) \end{cases} \quad (2.1)$$

Приймемо, що верхня межа завалу субстрату з біосировини в камері є хордою сегмента з кутом 2 (кут сектора), тоді за [9] запишемо рівняння:

$$y = -r(cos\varsigma/cos\alpha) - x \cdot tg\alpha \quad (2.2)$$

Повне розсіювання частинок по поверхні субстрату можна описати системою рівнянь, яка включає рівняння: межі завалу субстрату у закритій

камері, падіння частинок компонентів субстрату за параболічною траєкторією і кола, яке описує переріз закритої камери ферментації.

$$\begin{cases} y = (x-b)sin\beta - \big((x-b)cos\beta - xtg\big)\cdot\xi_0 - g\big((x-b)cos\beta - x\big) - V_0\, cos\xi_0^2/2 \\ y = -r(cos\varsigma/cos\alpha) - x\cdot tg\alpha \\ r^2 \neq x^2 + y^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

Координати точки перетину межі завалу субстрату у камері та кола, яке описує переріз обертової камери визначаємо із рівнянь (2.2.) та (2.3):

$$r^2 = (x - cos^2\varsigma/cos^2\alpha) = x(x - 2r\cdot tg\alpha\cdot(cos\ \varsigma/cos\ \alpha) + x\cdot tg^2\alpha) \quad (2.4)$$

Отже $x_{1,2} = r\cdot cos\ \ \varsigma\cdot sin\alpha \pm r\cdot sin\varsigma\cdot cos\alpha$

у іншому вигляді:

$$x_2 = r\cdot cos\ \ \varsigma\cdot sin\alpha - r\cdot sin\varsigma\cdot cos\alpha = -rsin(\varsigma - \alpha)$$

$$x_1 = r\cdot cos\ \ \varsigma\cdot sin\alpha + r\cdot sin\varsigma\cdot cos\alpha = -rsin(\varsigma + \alpha)$$

Отже маємо:

$$y_1^2 = r^2 - x_1^2 = r^2[-sin^2(\varsigma + \alpha)] = r^2 cos^2(\varsigma + \alpha)$$

$$y_2^2 = r^2 - x_2^2 = r^2[-sin^2(\alpha - \varsigma)] = r^2 cos^2(\alpha - \varsigma)$$

Остаточно маємо:

$$y_1 = r\cdot\cos(\varsigma + \alpha)$$

$$y_2 = -r\cdot cos(\varsigma - \alpha)$$

У точці, яка розташована зліва від вісі ординат, і є точкою перетину

межі завалу субстрату у камері та кола, яке описує переріз обертової камери, маємо наступні корені рівняння і розв'язок матиме вигляд:

$$\begin{cases} x_2 = -r \cdot \sin(\varsigma - \alpha) \\ y_2 = -r \cdot \cos(\varsigma - \alpha) \end{cases} \quad (2.5)$$

У рівняння параболи підставимо отримані значення x_2 і y_2:

$$-r \cdot \cos(\varsigma - \alpha) = (x - b)sin\beta - \big((x - b)cos\beta - xtg\big) \cdot \xi_0 - \\ -g\big((x - b)cos\beta - x\big) - V_0\, cos\xi_0^2/2 \quad (2.6)$$

За додаток 1, рис. 1А такі параметри як r, b, ς , приймемо сталими величинами. Розрахувавши $\beta = \psi_0 + \omega t_1$ (кут повороту лопаті обертової камери відносно осі абсцис), (кут нахилу вектора швидкості руху частинки субстрату до горизонту в початковий момент) та (початкову швидкість руху частинки субстрату при стіканні з лопатки матимемо:

$$-r \cdot \cos(\varsigma - \alpha) == (x - b)sin(\psi_0 + \omega t_1) - \big((x - b)cos(\psi_0 + \omega t_1) - xtg\big) \cdot \\ \xi_0 - -g\big((x - b)cos(\psi_0 + \omega t_1) - x\big) - r \cdot \sin(\varsigma - \alpha)/\big[\sqrt{\omega^2}(x - b)sin(\psi_0 + \omega t_1)\big] \quad (2.7)$$

Отримані рівняння свідчать, що саме кутовою швидкістю камери визначається рівномірне розсіювання частинок компонентів субстрату під час сходження з лопатки. Знайдемо радіальну швидкість руху компонентів субстрату по лопатці камери ферментації з врахуванням [11]:

$$V_1 = -(\mu\omega + 0{,}5 \cdot a_1) + \sqrt{\omega^2 + \mu^2 + 0{,}25a_1^2}$$

$$V_1 = -(\mu\omega + 0{,}5 \cdot a_1) - \sqrt{\omega^2 + \mu^2 + 0{,}25a_1^2} \quad (2.8)$$

Координати знаходження частинок компонентів субстрату під час їх стікання з лопатки камери за (2.6) розраховуються виходячи з радіальної

швидкості руху частинок компонентів субстрату по лопаті камери в момент стікання з лопатки $V_r(r\text{-}b)$. Виходячи з цього можна розрахувати кут нахилу вектора швидкості руху частинки субстрату до горизонту (абсолютне значення в початковий момент часу) та швидкість руху частинки субстрату V_o (також абсолютне значення в початковий момент часу).

2.3. Математичне моделювання енергетичних параметрів закритої камери ферментації

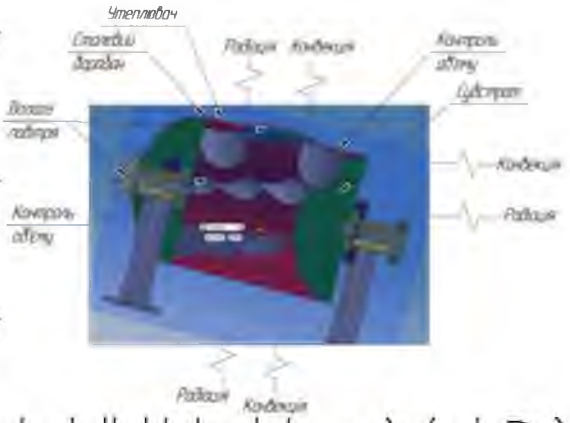
Камера ферментації закритого типу розглядалася як відкрита термодинамічна система в нестаціонарному стані. Робилося припущення, що суміш вологи повітря та субстрату заповнювала внутрішній об'єм камери і перемішувалася в межах зазначеного контрольованого об'єму. Для опису процесу обміну енергією між різними складовими камери та для здійснення кількісної оцінки різних енергетичних параметрів складали енергетичний баланс. Оцінку процесів в контрольованому об'ємі субстрату здійснювали для умов нестаціонарного характеру, приймаючи наступні припущення [6, 36]:

ологе повітря і субстрат всередині камери добре перемішуються і характеризуються середньою температурою T_c.

ермофізичні властивості субстрату та вологого повітря є еквівалентними властивостями, незалежними від зміни температури, а тиск всередині камери дорівнює атмосферному. Повітря надходить у камеру за атмосферних умов (T_{am},

сі параметри майбутньої моделі залежать від часу, а для спрощення математичних виразів – позначення часу t надалі пропущено в усіх символьних записах параметрів рівнянь [6, 34, 35].

НУБіП України



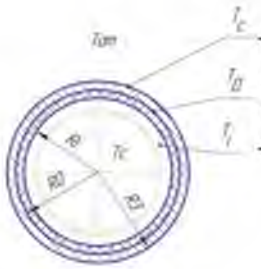


Рис. 2.4. Повздовжній (*а*) та поперечний (*б*) перерізи камери з основними робочими механізмами

Рівняння енергетичного балансу, яке описує різні режими зміни енергії, що переходить границю контрольованого об'єму наступне:

$$E_{\text{вн}} + Q_{\text{вн}} - E_{\text{зов}} = \frac{d}{dt}(IE_c) \tag{2.12}$$

Залежності для енергетичних параметрів представлені в рівнянні (2.12) можна виразити наступним чином:

$$E_{\text{вн}} = m_{\text{пов}} I_{\text{пов}}$$

$$E_{\text{зов}} = m_{\text{в.пов}} I_{\text{пов}} + Q_{\text{втрат}} \tag{2.13}$$

де $I_{пов}$ – ентальпія повітря, яке надходить ззовні, кДж/кг;

$m_{пов}$ – витрата повітря, що надходить в камеру і залишає його (тобто повітря, що використовується для аерації субстрату, кг/с);

$I_{в.пов}$ – ентальпія вологого повітря, кДж/кг, майже насиченого, яке виходить із камери при температурі еквівалентній температурі субстрату (T_c).

Ентальпія повітря на вході та виході з камери (тобто при температурах T_{am} і T_c) за дослідженням [6, 33] становить, °С:

$$I = (1{,}007T - 0{,}026) + \omega(2501 - 1{,}84), \tag{2.14}$$

У рівнянні (2.13) абсолютна вологість W представлена в кг водяної пари на кг сухого повітря і визначається як

НУБіП України

$$W = 0{,}623\frac{e}{(101{,}325 - e)}$$
$$e = RH \cdot e_{s,T} \quad (2.15)$$

де e і $e_{s,T}$ – парціальний тиск водяної пари в повітрі та в насиченому повітрі (кПа) при поточному значенні температури T (°С) і атмосферному тиску. Залежність для визначення $e_{s,T}$ має вигляд, кПа

$$e_{s,T} = exp\frac{(16{,}78T - 116{,}9)}{(T + 273{,}3)} \quad (2.16)$$

Швидкість зміни внутрішньої енергії субстрату, $d/dt(IE_c)$ згідно рівняння (2.12) за незначний інтервал часу dt визначається як:

$$\frac{d}{dt}(IE_c) = m_c C_{pc}\frac{dT_c}{dt} = m_c C_{pc}\frac{\Delta T_c}{\Delta t} \quad (2.17)$$

де m_c – маса субстрату, кг; C_{pc} – питома теплоємність субстрату при постійномузначенні тиску, Дж/(кг·°С).

Втрати теплоти через конвективне випромінювання $Q_{втрат}$ від зовнішньої поверхні камери до навколишнього середовища (2.13) задано формулою, Вт:

$$Q_{\text{втрат}} = Q_{\text{циліндр}} + Q_{\text{торці}} = U_{\text{цил}}A_{\text{цил}}(T_c - T_{am}) + U_{\text{торці}}A_{\text{торці}}(T_c - T_{am}) \quad (2.18)$$

$A_{цил}$ та $A_{тор}$ – площі зовнішніх циліндричної та торцевої поверхонь камери, м^2; $U_{цил}$ та $U_{тор}$ – загальний коефіцієнт теплових втрат циліндричної та торцевоїповерхонь камери, Вт·м^2/°С. $U_{цил}$ та $U_{тор}$ – величини, обернено пропорційніеквівалентним значенням теплопровідності ($1/R_{ек\text{-}цил}$ та $1/R_{ек\text{-}тор}$) між субстратом з температурою T_c та повітрям з температурою навколишнього середовища T_{am}.

Сумарна теплопровідність між субстратом та повітрям включає: стійкість до теплового випромінювання (R_l) між зовнішньою поверхнею камери та

повітрям з навколишнього середовища; теплопровідність (R_2) між зовнішньою поверхнею камери та зовнішнім повітрям; теплопровідність ізоляції (R_3); теплопровідність сталевих стінок камери (R_o); теплопровідність (R_4) між сумішшю субстрат-повітря і внутрішньою поверхнею камери.

Схеми теплопередачі для циліндричної поверхні та бічних стінок камери представлено на рис 2.1. Термічний опір циліндричної частини камери за рис. 2.2 визначається наступним чином:

$$R_1 = \frac{1}{h_1(2\pi r_3 L)};$$

$$R_2 = \frac{1}{h_2(2\pi r_3 L)};$$

$$R_4 = \frac{1}{h_4(2\pi r_3 L)}; \quad (2.19)$$

$$R_0 = \frac{ln(r_0/r_3)}{2\pi K_б L};$$

$$R_3 = \frac{ln(r_3/r_0)}{2\pi K_{із} L},$$

де h_1, h_4 та h_2 – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням між зовнішньою поверхнею камери та навколишнім повітря, коефіцієнт конвекції між вологим субстратом, повітряною сумішшю і внутрішньою поверхнею камери та коефіцієнт конвекції між зовнішньою поверхнею камери та зовнішнім повітрям відповідно, Вт/(м^2·°С); $K_б$ та $K_{із}$ – значення теплопровідності матеріалу камери (сталь) та ізоляції (скловолокно), Вт/(м·°С); r_i, r_0, r_3 та L – геометричні параметри камери.

Оскільки в процесі експерименту температури T_i і T_c були майже однаковими отже, конвективним опором внутрішньої поверхні камери можна знехтувати (R_5=0 і $R_{6вн}$=0, рис. 2.2).

НУБіП України

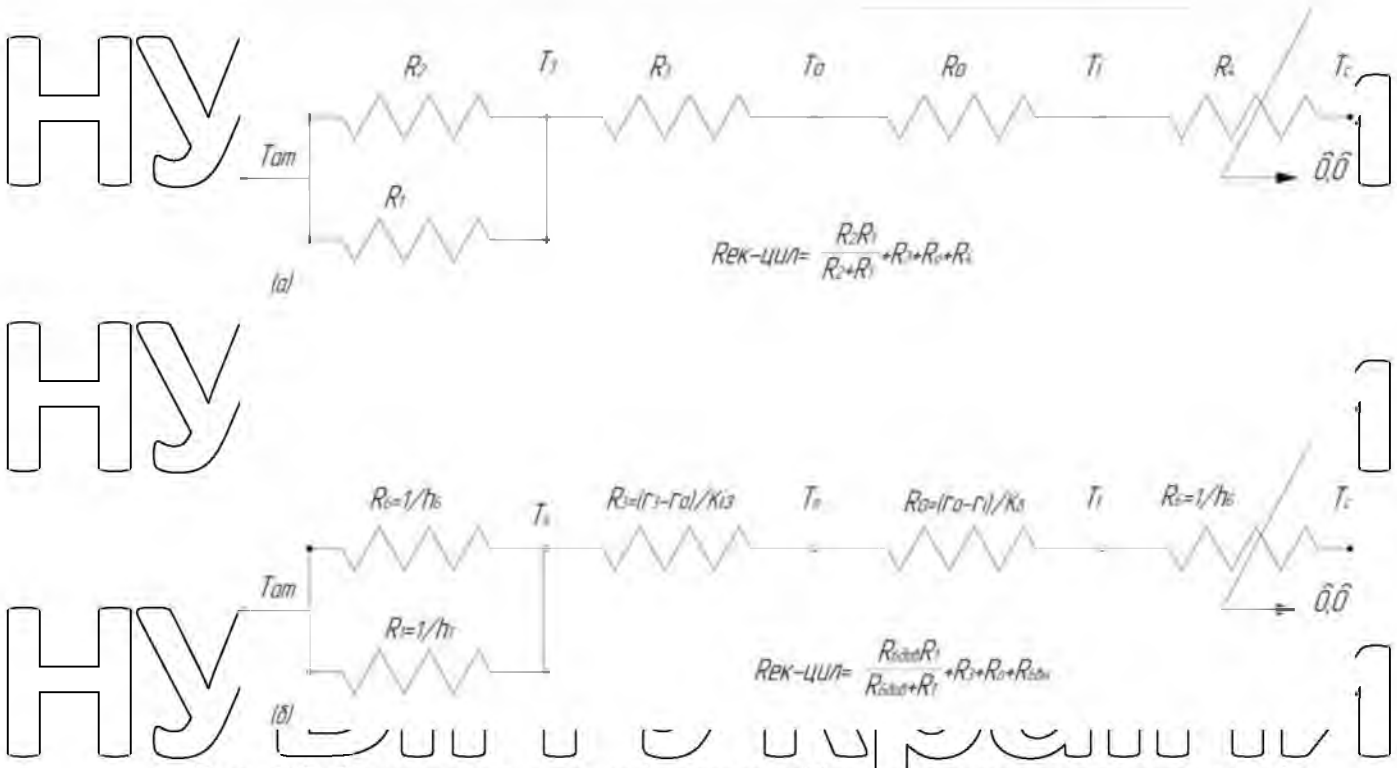


Рис. 2.2. Електрична аналогія термостійкості проти втрат теплоти між сумішшю субстрат-вологе повітря та зовнішнім повітрям: *а* – через циліндричну частину камери; *б* – через торцеві стінки камери.

Зовнішня поверхня камери обмінюється тепловим випромінюванням з поверхнею внутрішніх стін корпусу лабораторії факультету інженерії та енергетики. Якщо припустити, що ці поверхні мають температуру навколишнього середовища $T_{ам}$, коефіцієнт теплопередачі h_1 знайдемо за

$$h_1 = \varepsilon_3 \sigma (T_3 + T_{am})\left(T_3^{\,2} + T_{am}^{\,2}\right) \qquad (2.20)$$

де ε_3 – випромінювальна здатність зовнішньої поверхні камери та константа Стефана-Больцмана (5,667·10^{-8} Вт/(м^2·К^4)) відповідно. На зовнішній поверхні обертової камери присутній змішаний тип конвекції (природна та примусова). В роботі [6] представлено формулу для визначення коефіцієнту конвекції h_2 длязовнішніх поверхонь обертових камер, які мають високу частоту обертання. Дані формули не можна використовувати для розрахунків параметрів камер ферментації, які працюють на низьких частотах обертання. Найбільш придатною для визначення коефіцієнту конвекції h_2 для зовнішніх поверхонь

обертових камер є залежність, представлена в [6]:

$$N_u = \frac{h_{cp} L_{б.пов}}{K_{повітря}} = 0{,}135\sqrt[3]{0{,}5 Re_\omega^2 + Re_\infty^2 + G_r} \quad (2.21)$$

де $L_{б.пов}$ – окружність бічної поверхні камери ($L_{б.пов} = 2\pi r_3$) м.

У лабораторії механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України швидкість повітряного потоку дуже низька, і число Рейнольдса вільного потоку Re_∞^2 у рівнянні (2.21) прийнято рівним нулю. Число Рейнольдса, пов'язане з обертовим рухом камери, дорівнює $Re_\omega = 2\omega {r_3}^2 / \upsilon$, де ω кутова швидкість камери, υ – кінематична в'язкість повітря. G_r – значення числа Грасгофа на зовнішній поверхні камери, визначене при середньому значенні температури $(T_{am}+T_3)/2$.

Для встановлення придатності рівняння (2.21) щодо визначення коефіцієнту h_2, в поточних дослідженнях спочатку за рівнянням (2.21) встановили діапазони коефіцієнта h_2, які потім порівнювалися з діапазонами коефіцієнту h_2 для камери стаціонарного типу, представленими за [32] виразом:

$$h_2 = 1{,}32\left((T_3 - T_{am}) \cdot \pi D^{0{,}25}\right) \quad (2.22)$$

де D – діаметр камери ($2r_3$, м).

Рівняння (2.22) виведено для визначення коефіцієнта конвекції для зовнішньої поверхні горизонтальної циліндричної частини камери. Під час процесу компостування зміна в часі коефіцієнту h_2 оцінена за допомогою рівняння (2.21) при різних швидкостях обертання камери (5, 10, 30 і 50 об/хв), а результати оцінки представлені в додаток Б. Порівнювалися значення коефіцієнту передачі h_2, отримані за рівняннями (2.21) та (2.22) при нерухомій камері. Дані додаток Б свідчать, що рівняння (2.21) є адекватним лише для камер з частотою обертання 50 об/хв. Для камер, що працюють на низьких частотах обертання (<50 об/хв) та за умов природної конвекції, для оцінки параметра h_2 рекомендується використовувати залежність (2.22). Це пояснюється тим, що при змішаній або примусовій видах конвекції значення h_2 будуть завжди набагато вищими, ніж ті, що визначені за умов природної конвекції.

Отже $Q_{цил}$ визначаємо, обчислюючи $U_{цил}$ як $1/R_{ек\text{-}цил}$ (рис. 2.2). Для визначення втрат теплоти випромінюванням та конвекцією від бічних стінок ($Q_{тор.}$), значення $U_{тор.}$ визначається як $1/R_{ек\text{-}тор}$, а відповідна графічна залежність представлена в додаток Б. Як і в рівнянні (2.22), коефіцієнт конвекції для зовнішньої поверхні бічних стінок камери за [32] складає:

$$h_{б.зов} = \sqrt[4]{1{,}42\left(\left(T_З - T_{am}\right) / D\right)} \quad (2.23)$$

Рівняння енергетичного балансу камери має вигляд:

$$Q_{ве} = \Delta I E_c + Q_{втрат} + Q_{пов}$$

Де $Q_{втрат}$ – втрати теплоти випромінюванням та конвекцією від циліндричної бічної та торцевих поверхонь камери ($Q_{втрат} = Q_{тор} + Q_{цил}$).

Втрати теплоти з відпрацьованим повітрям під час процесу аерації ($Q_{пов}$) визначали як $m_{пов}(I_c - I_{am})$, а радіаційні втрати тепла ($Q_{рад}$) окремо можуть бути оцінені як $Q_{рад} = h_1 (A_{тор} + A_{цил}) (T_З - T_{am})$ швидкість зміни внутрішньої енергії субстрату. Енергетичні складові рівняння (2.23) обчислювали на кожному з інтервалів часу, підставляючи відповідні енергетичні параметри з рівнянь (2.13) – (2.23) у рівняння (2.24). Вхідними параметрами для розрахунку були виміряні значення T_{am}, T_c, $T_З$, RH_{am}, розміри камери, теплофізичні властивості повітря, субстрату, ізоляційного матеріалу та матеріалів, з яких виготовлено обертову камеру ферментації. Теплофізичні властивості є постійними значеннями, незалежними від температури (додаток Б, табл. 1).

2.4. Висновки до розділу 2

1. Представлено математичну модель, за якою можна визначити кутову швидкість закритої камери ферментації, при якій спостерігається повне розосередження частинок компоненту по поверхні сегменту субстрату з лопатки рухомим потоком.
2. Виконано математичне моделювання енергетичних параметрів закритої камери ферментації. Представлено рівняння енергетичного балансу, яке описує різні режими зміни енергії контрольованого об’єму субстрату,

швидкість зміни внутрішньої енергії субстрату, втрати теплоти через конвективне випромінювання тощо. Розроблено схему, яка є електричною аналогією термостійкості щодо втрат теплоти між сумішшю субстрат-вологе повітря та зовнішнім повітрям.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Методика проведення експериментальних досліджень

За сучасної інтенсифікації сільськогосподарського виробництва досить гостро стоїть питання збереження родючості ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур [1]. Для досягнення рентабельності вирощування необхідно підвищувати врожайність культури, що досягається здебільшого за рахунок застосування великої кількості мінеральних добрив і хімічних засобів. Проте такий спосіб виробництва призводить до зниження природної родючості та деградації ґрунтів [1; 2]. Одним із шляхів підвищення родючості ґрунту є використання органічних добрив у вигляді субстрату анаеробного зброджування та компосту на основі біологічних матеріалів [2; 3].

В останні десятиліття набули поширення біогазові реактори, що дозволяють утилізувати тваринницьку продукцію тваринницьких ферм і отримувати органічні добрива у вигляді рідких і твердих субстратів [4; 5]. Кожна технологія має свої недоліки та переваги.

До суттєвих недоліків рідкого біогазового зброджування можна віднести використання великих об'ємів води для забезпечення субстрату вологістю 80–90 % у процесі ферментації, необхідність великих резервуарів для зберігання субстрату через малий термін зберігання субстрату. .

Технологія анаеробного зброджування субстрату в твердій формі дозволяє переробляти біомасу без додаткового споживання води, але виробничі потужності відсутні [6; 7].

Одним із способів виробництва якісних органічних добрив є компостування біомаси. Однак виготовлення якісного компосту – тривалий процес, який передбачає необхідність ізоляції біомаси від потрапляння шкідливих елементів у навколишнє середовище. За даними [8], основною перешкодою для широкого впровадження цієї технології є низька ефективність цього процесу. Згідно з дослідженнями [8], інтенсифікувати процес

компостування, підвищити продуктивність і скоротити час роботи можна шляхом приготування компостів у бурах, з періодичним провітрюванням і перемішуванням. Однак разом з інтенсифікацією процесу відбувається значне виділення в атмосферу летких сполук, що погіршує екологічну ситуацію.

Технологію компостування для закритого компостування можна скасувати. Ця технологія дозволяє підвищити ефективність процесу компостування за рахунок підтримання оптимальних теплових режимів у діапазоні від 50 до 70 °С, забезпечення аерації повітрям та можливості нейтралізації проміжних летких сполук [9; 10]. Однак технологія компостування в закритих камерах вимагає значних витрат енергії та інвестицій. Також до істотних недоліків можна віднести складність забезпечення оптимального змішування субстрату.

З метою проведення експериментальних досліджень було спроектовано дослідний зразок камери ферментації закритого типу, рис. 3.1 [24, 36].

а *б*

Рис. 3.1. Дослідна установка:

а – загальний вигляд камери ферментації; *б* - встановлення лопаток [24, 36]:

Дослідна установка складається з герметичної камери ферментації закритого типу 5, яка має циліндричну форму і встановлена горизонтально на подих осях 7. Камера 5 оснащена люком 6 для завантаження субстрату і вивантаження готового компосту. Завантаження субстрату та вивантаження компосту відбувається періодично, що для дослідної установки є припустимим. Також люк 6 обладнаний автоматичним клапаном регулювання тиску, який

відкривається при зростанні тиску понад 2 атм. З метою перемішування субстрату на внутрішній поверхні камери 5 закріплені вигнуті лопатки 11 та 4 поздовжньо розмішені трубки із форсунками для аерації субстрату. Вісі 7 встановлені в підшипникових опорах 4. Вісь, до якої через фланець приєднаний електромеханічний привід, виконана глухою, а інша вісь – виготовлена у вигляді штуцера 10 із внутрішньою різьбою. До штуцера 10 з зовнішньої сторони приєднана з'єднувальна муфта 9 (для забезпечення подачі повітря під час обертання камери 5). Камера 5 приводиться в рух електромеханічним приводом, закріпленим на рамі 3, який складається з електродвигуна 1 потужністю 3,5 кВт, планетарного редуктора 2 та частотного перетворювача.

Під час обертання камери, завдяки дії її комбінованих органів, здійснюється змішування компонентів. При цьому вигнуті лопатки та чотири поздовжньо розмішені трубки із форсунками створюють протипотоковий рух частинок, який сприяє рівномірному розподілу компонентів в компості.

Стійка 8 є регульованою, завдяки чому можна змінювати висоту закріплення опори камери 5. Дана конструкція дозволяє змінювати кут нахилу вісі обертання камери в межах від 0 до 20 градусів відносно горизонтальної поверхні. Регулювання кута нахилу є дискретним із кроком 5 градусів.

Особливістю установки також є можливість змінювати кут нахилу осі до горизонту, що, в першу чергу, впливає на кут установки статичних лопатей. Одна опора виконана з можливістю регулювання висоти монтажу опори реактора (контрольна стійка 8). Така конструкція дозволяє змінювати кут нахилу осі обертання реактора від 0 до 20 градусів відносно горизонтальної поверхні. Регулювання кута нахилу дискретне з кроком 5 градусів. Для вимірювання температури компостованої сировини на внутрішній поверхні ємності встановлені термопари типу К. Вони забезпечують вимірювання температури в різних зонах, результати яких потім можна усереднити.

Оскільки резервуар обертається, термопари та вимірювання температури періодично плануються.

Електромеханічний привід складається з електродвигуна потужністю 3,5

кВт, планетарного редуктора 2 і частотного перетворювача (HITACHI WJ200) для керування швидкістю реактора. Загальна маса установки без навантаження 92 кг, загальний об'єм реактора 220 л.

Завантаження сировини і вивантаження готового компосту відбувається періодично через завантажувальний люк 6. Для дослідної установки така форма завантаження прийнятна, дозволяє легко обслуговувати, очищати від залишків матеріалів, мити тощо.

На початку експериментальних досліджень зовнішня поверхня реактора була теплоізоляційною для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище. Реактор також містився в невеликому об'ємі приміщення з мінімальним рухом повітря. У період, коли реактор не обертався, зворотний клапан був підключений до системи витяжної вентиляції.

Для компостування контейнер барабанного типу 5 був на 50 % заповнений відповідним субстратом.

Для забезпечення процесу самозігрівання зброджування субстрату під час компостування проводили періодичне перемішування з одночасною подачею повітря для аерації. Субстрат перемішували протягом 5 хв кожні 55 хв. Також вимірювали температуру субстрату на початку змішування. Продуктивність системи подачі повітря була налаштована для забезпечення в 4 рази більшої кількості повітря в реакторі порівняно з об'ємом субстрату в реакторі, за умови, що запобіжний клапан у порту завантаження реактора не активується.

Для забезпечення руху підкладки в поздовжньому напрямку барабанного реактора періодично змінювали вісь обертання барабана, встановлюючи по черзі кут нахилу 0 і 10 градусів [14].

Під час досліджень було проведено три серії дослідів зі швидкістю обертання реактора при перемішуванні, яка становила 5, 10, 15 обертів за хвилину, з подальшим спостереженням за температурним режимом компостування. Для побудови прогресу температурного процесу ці зміни температури протягом 12 годин були усереднені.

Створення математичної моделі не було метою експериментального

дослідження. Для порівняння та візуалізації даних, отриманих у процесі компостування в різних режимах змішування, ми використовували середнє значення вибірки експериментальних даних, відібраних за певний відповідний інтервал часу. При визначенні середнього арифметичного значення для кожної вибірки даних розраховували стандартне відхилення, дисперсію та похибку вибірки. Для проведених досліджень максимальна похибка вибірки становила менше 5 % порівняно із середнім арифметичним експериментального параметра.

В результаті проведених досліджень отримано залежності впливів частоти обертання реактора на температурний режим і хід процесу штампування підкладки (рис. 3.2).

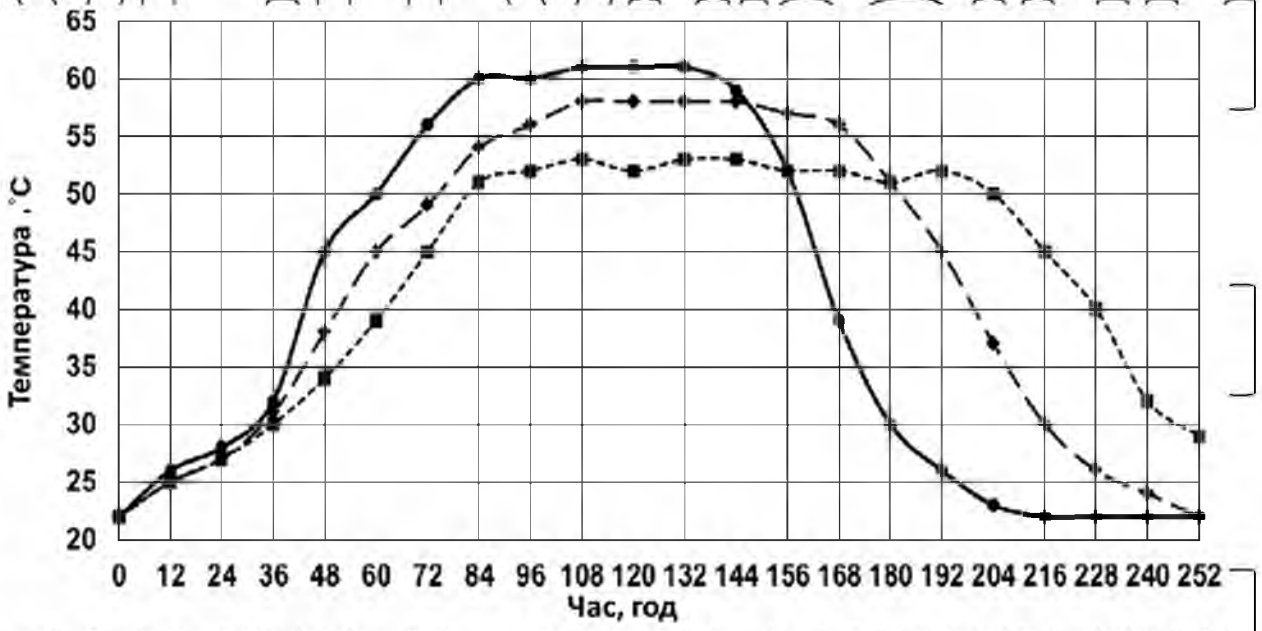


Рис. 3.2. Температурні режими процесу бродіння органічної сировини

Аналіз отриманих залежностей, рис. 3.1, дозволяє виділити чотири основні етапи реалізації субстратної ферментації. На першому етапі спостерігався повільний нагрів суміші до температури 30 °С в інтервалі часу від 0 до 36 годин. На цьому етапі істотного впливу режиму змішування субстрату на зміну температури не виявлено.

Другий етап характеризується швидким нагріванням суміші та досягненням температури 50 °С, що відповідає початку термофільного режиму компостування. Експериментальні дані показують, що на цьому етапі на

інтенсивність нагріву підкладки починає впливати режим перемішування. Так, при швидкості реактора 10 об/хв (обертів за хвилину) температура початку термофільного режиму досягається на 60 годині експерименту, при швидкості 5 об/хв – на 72 годині, при 15 об/хв – на 84 годині.

Третій етап ферментації субстрату характеризується температурою і тривалістю термофільного процесу. При швидкості реактора 10 об/хв термофільний режим триває 98 годин, а температура основної фази бродіння знаходиться в діапазоні від 60 до 61 °С. При частоті 5 об/хв термофільний режим триває 108 годин, а температура основної фази бродіння знаходиться в діапазоні від 55 до 58 °С. При частоті 15 об/хв термофільний режим триває 120 годин, а температура основної фази бродіння знаходиться в діапазоні від 51 до 53 °С.

Останній етап бродіння характеризується зниженням температури субстрату нижче 30 °С, що характеризує закінчення процесу бродіння. Так, при частоті перемішування 10 об/хв процес бродіння субстрату становить 180 годин, при 5 об/хв – 216 годин, при 15 об/хв – 248 годин. Використання оптимального режиму змішування дозволяє скоротити час ферментації субстрату з 16,66 % до 27,42 %.

Таблиця 3.1

Зміна кислотності та зольності субстрату при різних режимах змішування

Ферментація час, год	**Режим змішування**					
	5 об/хв		10 об/хв		15 об/хв	
	pH	Зола вміст, %	pH	Зола вміст, %	pH	Зола вміст, %
0	6,6	13,05	6,6	13.05	6.6	13.05
24	5,9	13,21	5,9	13.21	5.8	13.21
48	6,0	13,31	6,2	13.42	5.9	13.45
72	6,6	13,52	6,8	14.27	6.2	13.56
96	6,8	14,65	7,0	15.85	6.6	14.45
120	7,0	15,13	7,1	16.43	6.8	14.96
144	7,1	16,05	7,1	17.15	7.0	15.61
168	7,1	16,58	7,2	17.61	7.1	16.05
192	7,2	17,31	7,2	17,89	7.1	16.58

216	7,2	17,43	–	–	7.2	17.15
240	–	–	–	–	7.2	17.25

Аналіз даних таблиці 1 показує, що в часовому інтервалі від 0 до 48 годин спостерігається кисла фаза бродіння, яка характеризується зниженням кислотності субстрату до 5,9 і нижче. Згодом, у процесі бродіння, кислотність поступово підвищується і досягає нейтрального значення в кінці бродіння. Зміна зольності субстрату свідчить про хідрозщеплення сировини в процесі ферментації субстрату. Аналіз рис. 2 і табл. 1 дозволяє зробити висновок, що чим вища температура термофільного режиму бродіння, тим активніше і повніше відбувається процес перетворення сировини. Так, при швидкості реактора 5 об/хв зольність субстрату під час ферментації зросла на 33,56 %, при частоті 10 об/хв – на 37,08 % і при частоті 15 об/хв – на 32,18 %.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що шляхом вибору оптимального способу транспортування можна оптимізувати час і повноту ферментації даного типу субстрату.

Подальші дослідження необхідно проводити в напрямку підвищення ефективності реакторів барабанного типу, шляхом знаходження оптимальної форми внутрішніх лопатей і знаходження ефективного складу компонентів субстрату.

На нашу думку, такий вплив обертання реактора на температурний режим пояснюється тим, що при швидкості обертання 5 об/хв субстрат недостатньо перемішується і частково насичується повітрям, а при 15 об/хв збільшується відцентрова сила, що призводить до зниження рухливості субстрату та недостатнє насичення киснем.

Під час процесу ферментації субстрату періодично один раз на добу вимірювали кислотність субстрату та аналізували його зольність, таблиця 1.

На початку проведення експериментальних досліджень, для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище, зовнішню поверхню камери 5 було утеплено та теплоізольовано. Дослідна установка була розміщена в кімнаті невеликого об'єму, із мінімальним рухом повітря. В період коли камера не оберталася, стравний клапан був підключений до витяжної системи вентиляції.

Субстрат складався із 50% суміші підстилкового гною та січки соломи (загальною вологістю 45%), 20% пташиного посліду та 30% рослинних матеріалів (15% торфу та 15% тирси дерев листяних порід) [36]. Камера 5 на 50% заповнювалася субстратом. Для забезпечення саморозігрівного процесу ферментації субстрату під час компостування, його періодично перемішували із одночасною подачею повітря для аерації. Перемішування здійснювали кожні 53 хв, а час перемішування складав 7 хв. Продуктивність системи подачі повітря налаштовано так, щоб, за умови неспрацьовування зворотного клапану в завантажувальному люці 6, відношення кількості повітря до субстрату було 4:1. Проби перемішаних компонентів субстрату відбирались трубчатим пробовідбірником в різних точках камери при знятій кришці на кожному етапі компостування. Вологість субстрату вимірювалася приладом ZD-05.Маса проби визначалася за допомогою терезів лабораторних ГЕН-320.

Рис. 3.2. Загальний вигляд приладу ZD-05

НУБіП України

Рис. 3.3. Загальний вигляд терезів лабораторних FEH-320

Температура субстрату вимірювалася датчиком температури ТСП 1-8. Частоту обертання камери вимірювали портативним оптичним тахометром testo 465.

Рис. 3.4. Загальний вигляд датчика температури ТСП 1-8

Рис. 3.5. Загальний вигляд портативного оптичного тахометра testo 465

Одержані результати експериментальних досліджень опрацьовували з застосуванням пакету прикладних програм Microsoft Excel 2003 та Statistica 6.0.

3.2. Результати дослідження параметрів процесу змішування компонентів у субстраті та параметрів закритої камери ферментації

Щоб встановити раціональні значення діючих факторів виконано попередні уточнюючі дослідження. Оскільки процес розосередження частинок компонентів в субстраті з біосировини під час змішування протікає в часі, тому зростання часу змішування призводить до підвищеної рівномірності розподілу компонентів у субстраті. Залежність ступеню рівномірності змішування на відрізку часу 2,5–7 хвилин від періоду змішування.

Після перебування субстрату в камері ферментації упродовж 1,25 хв рівномірність змішування складала 88,3%, а за наступні 1,25 хв зросла до 93,1%, тобто рівномірність субстрату наблизилась до нижньої межі мікробіологічних вимог щодо якості. При тривалості змішування 5 хв рівномірність змішування зросла до 94,3%. Подальше збільшення часу змішування призводить до погіршення рівномірності змішування компонентів усубстраті, що пояснюється явищем сегрегації. Оптимальним часом змішуванняє діапазон від 5,0 до 5,5 хвилин. Даний діапазон прийнято для подальшого дослідження процесу змішування компонентів у субстраті.

В представлено залежність ступеню змішування частинок компонентів у субстраті (виражений коефіцієнтом варіації, %) від вмісту контрольного компоненту в суміші. Дослідження (додаток И, рис. 2) свідчать складність розподілу малих доз в субстраті, що доводить ефективність стадійного методу змішування компонентів у субстраті під час виробництва компостів.

Якщо концентрацію контрольного компоненту в суміші збільшувати до 5%, спостерігається явище зростання нерівномірності змішування.

Наступним етапом досліджувалась залежність якості змішування компонентів у субстраті від кутової швидкості обертання камери ферментації при сталих значеннях ступеню заповнення камери субстратом 50%, часу змішування 5 хв. та вмісті контрольного компоненту в суміші 3% від загальної маси субстрату (додаток И, рис. 3). При куті встановлення стаціонарної лопатки

24 градуси та ширині лопатки 28 мм повне розсіювання компонентів субстрату по вільній поверхні робочого сегменту відбуватиметься в оптимальному діапазоні значень кутової швидкості камери рівний =0,93…1,18 рад/с (n=8,5…11,3 об/хв).

В даному діапазоні спостерігалась найвища якість перемішування компонентів субстрату, яка оцінювалася за вмістом контрольного компоненту в субстраті. Вміст контрольного компоненту в субстраті складав 3% від загальної маси матеріалу в камері. Найменше значення коефіцієнту варіації фактичного розподілу контрольного компоненту в пробах склало 6,04% при =1,05 рад/с. Подальше зростання кутової швидкості камери (>1,18 рад/с) свідчить про різке погіршення якості змішування. Це пояснюється збільшенням відцентрової сили, яка притискає частинки субстрату до стінок камери та призводить до зменшення активних потоків в поверхневих зонах камери.

3.3. Результати дослідження енергетичних параметрів закритої камери ферментації

Завдяки процесам метаболізму, які протікають у субстраті, в камері виділяється значна кількість теплоти. Зміна температури в часі представлена в (додаток В).

Температура субстрату почала різко зростати після забезпечення відповідних умов на усіх етапах ферментації. Через вміст органічних речовин та наявності азотистих сполук протягом перших двох днів температура субстрату T_c швидко зросла майже до 53 ^{0}C, а протягом 72 годин роботи камери значення температури досягло свого максимуму – 66,7 ^{0}C. Далі процес ферментації тривав протягом більше ніж 12 годин при температурі 60 ^{0}C.

За (додаток В) температура внутрішньої поверхні камери T_i майже дорівнювала T_c протягом перших чотирьох днів роботи. Однак в кінці процесу ферментації максимальна різниця становила близько 4°C. Відповідно,

параметром термостійкості внутрішніх поверхонь камери можна знехтували, не ставлячи під загрозу точність проведення дослідження.

Зміна коефіцієнта тепловиділення та накопиченої теплоти, яка виділяється в процесі компостування, протягом циклу ферментації (107 год.) представлена в додатку Г. Швидкість тепловиділення при максимальному значенні температури 66,7 ^{0}С через 72 год. процесу ферментації становила 9,3 Вт/кг.

Загалом під час процесу ферментації виділялося 1,9 МДж теплоти з 1кг органічної сировини. Зміна теплоти залежить від кількох параметрів, які змінюють напрямок протікання хімічних реакцій: ефективності повітрообміну, рівномірності розподілу вологи, кисню та азоту в компості, концентрації цих речовин тощо. За додаток Г зменшення швидкості тепловиділення спостерігається на 18 і 48-й годинах роботи. Різке зниження температури компосту спостерігалося коли T_c досягла 66,7 ^{o}С – фаза охолодження. Дана температура була вищою за граничне значення температури термофільного режиму, тому ріст і активність мікробів уповільнювалися. Як наслідок, швидкість виділення теплоти, а також температура компосту, різко знизилися. Іншою причиною є те, що споживання біодоступних поживних речовин мікроорганізмами зменшує метаболічну реакцію [34]. Втрати теплоти через конвекцію і випромінювання через зовнішню поверхню для камер ферментації становлять 60–90% від загальної кількості втрат теплоти. Для даного дослідження втрати теплоти в процесі компостування представлені в додатку Д. Близько 93% виробленої в процесі компостування теплоти виділяється в навколишнє середовище в результаті процесів конвекції, теплового випромінювання та аерації. З них більша частина тепловтрат (97 % від загальних втрат) спричинена втратами через поверхні камери конвекцією, з них 69 % через циліндричний корпус та 28 % через торцеві поверхні. І лише 2% теплоти втрачалося в процесі аерації. Близько 1% від загальних втрат теплоти пов’язані з середовищем, яке оточує камеру – стіни лабораторії з еквівалентною температурою, рівною температурі повітря в лабораторії (T_{am}). Однак для камер, що працюють на відкритому повітрі, зовнішня поверхня камери обмінюється

теплотою з зовнішнім середовищем, з еквівалентною температурою, $T_{зов}$, яка значно нижча ніж температура повітря в лабораторії, $T_{ат}$. У цьому випадку втрати теплоти будуть значно вищими. Під час процесу ферментації, залежність швидкості зміни внутрішньої енергії субстрату $W_C\ m_C C_{pC}\ (dT_C\ /\ dt)$ і швидкості тепловиділення ($Q_{втрат}$) від часу протікання процесу ферментації представлена в додатку Ж. Швидкість зміни внутрішньої енергії в значній ступені залежить від змін теплопродукції, а також температури субстрату. В період активної фази ферментації внутрішня енергія субстрату зростала, тоді як в період фази охолодження внутрішня енергія зменшувалась. Отже, тепло, отримане субстратом, становило лише 4% у вигляді внутрішньої енергії.

За оптимальних умов реалізації процесу виробництва компосту, після процесу відстоювання, процес ферментації, який починається на 10 годині роботи камери, включає три фази (додаток З): фаза помірної температури, (T_c=25–45 $^\circ$С), яка триває добу; високотемпературна (термофільна) фаза, яка триває два дні; фаза охолодження та дозрівання, яка триває від одного дня у реакторі та до кількох днів поза реактором для завершення процесу дозрівання.

3.4. Висновки до розділу 3

редставлено методику проведення експериментальних досліджень та конструкцію закритої камери ферментації для виробництва компосту.

становлено раціональні параметри процесу змішування компонентів у субстраті та конструктивні параметри камери ферментації.

иконано енергетичний аналіз камери та встановлено кількість втрат теплоти в результаті конвекційного та радіаційного випромінювань, а також під час реалізації процесу аерації субстрату.

НУБіП України

РОЗДІЛ 4

СТРАТЕГІЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА З БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ВІДХОДІВ

4.1. Розвиток галузі виробництва біопалива як детермінанта економічного зростання та соціального добробуту: світовий досвід таперспективи для України

Розвиток сучасної економічної системи стає все більш залежним від достатнього забезпечення якісними енергетичними ресурсами, що обумовлено інтенсифікацією і трансформацією процесів механізації та автоматизації усіх галузей. Зростання енергетичних потреб суспільства відбувається паралельноіз усвідомленням необхідності гарантування екологічно безпечного розвитку суспільства. Збалансоване поєднання екологічно орієнтованого виробництва, соціальної складової та необхідність підвищення ефективності функціонування галузей сформували концепцію сталого розвитку, успішна реалізація якої неможлива без розвитку альтернативної енергетики та впровадження біоенергетичного компоненту розвитку економіки.

Незалежно від рівня економічного і соціального розвитку суспільства перед людиною завжди постає глобальна проблема енергетичного забезпечення власної життєдіяльності. Це стосується забезпечення, насамперед, продовольчими ресурсами і ресурсами для опалення, освітлення та пального для здійснення перевезень тощо [40].

Доцільність та ефективність виробництва біопалив доводить і світовий досвід. Як зазначає Р. Медіпаллі, «Світова енергетична криза та глобальне потепління є двома великими проблемами, з якими сьогодні стикається людство, головним чином через зростання кількості населення, швидку індустріалізацію та збільшення використання викопного палива. Отже, існує необхідність розвитку відновлювальних джерел енергії для забезпечення стійкого розвитку енергетичної галузі» [62].

У відповідності до планів провідних міжнародних енергетичних

організацій та стратегічних намірів урядів держав визначено розвиток нетрадиційних та поновлюваних джерел енергії одним із найбільш перепективних та пріоритетних напрямів розв'язання проблем енергозабезпечення. Наявність поновлюваної ресурсної бази та екологічна складова поновлюваних джерел енергії є їх визначальними перевагами в умовах вичерпання викопних енергетичних ресурсів та зростаючих темпів забруднення довкілля. Альтернативна енергетика як один із базових напрямів розвитку енергетичних технологій, разом із інформаційними та нанотехнологіями, стає важливою складовою нового постіндустріального технологічного розвитку.

У 2019 році у структурі світового енергоспоживання частка альтернативної енергетики становила 18% від загальної спожитої енергії, що свідчить про поступове заміщення традиційних викопних палив (частка енергії біомаси у структурі альтернативної енергетики становила 68,6%, що на15,9% більше ніж у 2000 р.) [68]. У 2019 р. частка біоенергетики у структурі загального споживання енергії становила 11,3%. При цьому частка біопалива у загальній структурі споживання палив у транспортному секторі становила 3,1% [68].

Найбільш вагомими складовими біоенергетичного потенціалу є виробництво біоетанолу та біодизелю. У 2019 році світовими лідерами виробництва рідких біопалив (біоетанолу та біодизелю) були США (48,2% та 19,5% світового виробництва), Бразилія (26,2% та 12,0% світового виробництва) та Європейський Союз (4,9% та 34,1% світового виробництва) [68]. Рейтинг країн за обсягами виробництва біопалива та основні види сировини для його виробництва наведено у табл. 4.1.

На даний час близько 64% біоетанолу виробляється з кукурудзи, 26% – з цукрової тростини, 3% – з меляси, 3% – з пшениці, а решта – з інших видів сировини, зокрема, з маніоки або цукрових буряків. Близько 77% світового виробництва біодизелю базується на використанні рослинних олій (37% олії ріпака, 27% соєвої олії та 9% пальмової олії) або відпрацьованих олій (21%). Більш досконалі технології, засновані на використанні лігніно-целюлозної сировини (наприклад, залишки рослин, спеціальні енергетичні культури або

деревна біомаса), не становлять значної частки у загальному виробництві біопалива (рис. 4.1).

Таблиця 4.1

Рейтинг країн за обсягами виробництва біопалива та основні видисировини для його виробництва

Рейтинг виробництва			Основна сировина	
Країна	Біоетанол	Біодизель	Біоетанол	Біодизель
США	1 (43,2%)	2 (19,5%)	Кукурудза	Соєва олія
ЄС	4 (4,9%)	1 (34,1%)	Цукрові буряки/пшениця/ кукурудза	Ріпакова олія/відпрацьовані жири
Бразилія	2 (26,2%)	4 (12,0%)	Цукрова тростина/кукурудза	Соєва олія
Китай	3 (8,1%)	8 (2,2%)	Кукурудза/касава	Відпрацьовані жири
Індія	6 (2,1%)	(0,4%)	Меляса	Відпрацьовані олії
Канада	7 (1,4%)	10 (0,7%)	Кукурудза/пшениця	Олія каноли/соєва олія
Індонезія	21 (0,2%)	3 (12,3%)	Меляса	Пальмова олія/соєва олія
Аргентина	9 (0,9%)	5 (6,6%)	Меляса/кукурудза	Соєва олія
Таїланд	8 (1,4%)	6 (3,6%)	Меляса/касава	Пальмова олія
Колумбія	13 (0,4%)	10 (1,4%)	Цукрова тростина	Пальмова олія
Парагвай	14 (0,4%)	17 (0,03%)	Цукрова тростина	Соєва олія

Світовий сектор виробництва біопалива зазнає сильного впливу національної політики, що має три основні цілі: підтримка фермерів, зменшення викидів парникових газів та/або зниження енергетичної незалежності.

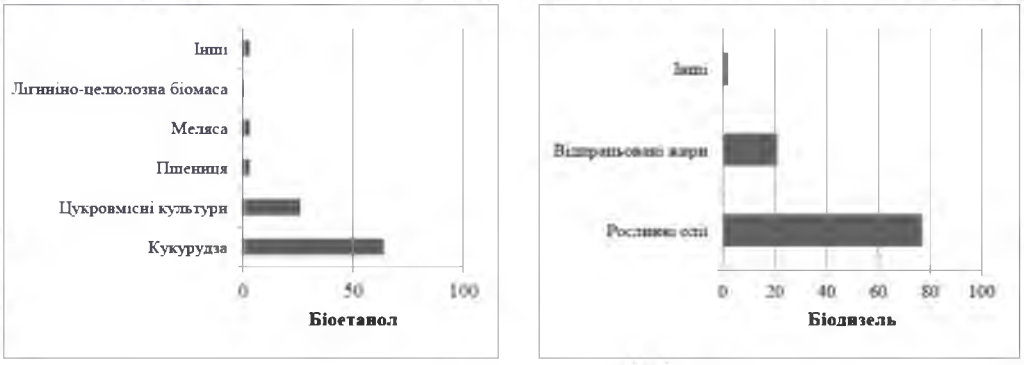


Рис. 4.1. Структура використаної сировини для виробництва рідких біопалив у світі у 2022 році

З кожним роком спостерігається позитивна тенденція до інтенсивнішого використання відновлюваних джерел енергії і в Україні. Проте ефективному розвитку даної сфери енергетики перешкоджає низка проблем законодавчого

характеру, висока вартість електроенергії з відновлюваних джерел енергії, брак необхідного забезпечення фінансами, інноваційними технологіями.

Для України, як і ряду інших держав, досягнення таких стратегічних цілей, як продовольча безпека, енергетична безпека та екологічна безпека, є одними із пріоритетів сучасного етапу розвитку, що обґрунтовує необхідність розвитку енергетичної галузі.

Світові тенденції щодо стрімкого розвитку альтернативної енергетики та галузі біоенергетики у поєднанні із системною кризою енергетичної галузі в Україні спричинили необхідність проведення детального дослідження щодо перспектив розвитку виробництва біопалив в Україні.

Україна визначила розвиток сільського господарства як стратегічну мету. Однак вона стикається з жорсткою глобальною конкуренцією на сільськогосподарських ринках та обмеженими фінансовими ресурсами. Розвиток сектору біопалива пропонує потенціал як для розвитку сільського господарства України, так і для підвищення її енергетичної незалежності [16]. Водночас Україна є єдиним потужним сільськогосподарським виробником, чиє виробництво біопалива скоротилося з 2010 року [70].

У 2012 році Україна прийняла Закон «Про альтернативні види палива», що став першим законом, який офіційно регламентував виробництво біопалива [27]. Законом було визначено, що обов'язковий вміст біопалива у складі нафтового палива у 2014-2015 роках мав становити 5%, а з 2016 р. – 7%. Однак 12 лютого 2015 року Верховна Рада скасувала вимоги щодо обов'язкового вмісту біопалива. На той момент в державі не було ні інфраструктури для змішування біопалива, ні державної системи контролю за дотриманням вимог. У 2017 році Кабінет Міністрів України ухвалив Нову Енергетичну Стратегію України до 2035 р. цілями якої на 2035 рік є зростання частки ВДЕ у первинному постачанні енергії [17]. Динаміка зростання частки ВДЕ у загальному первинному постачанні енергії, відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 р. наведена на рис.

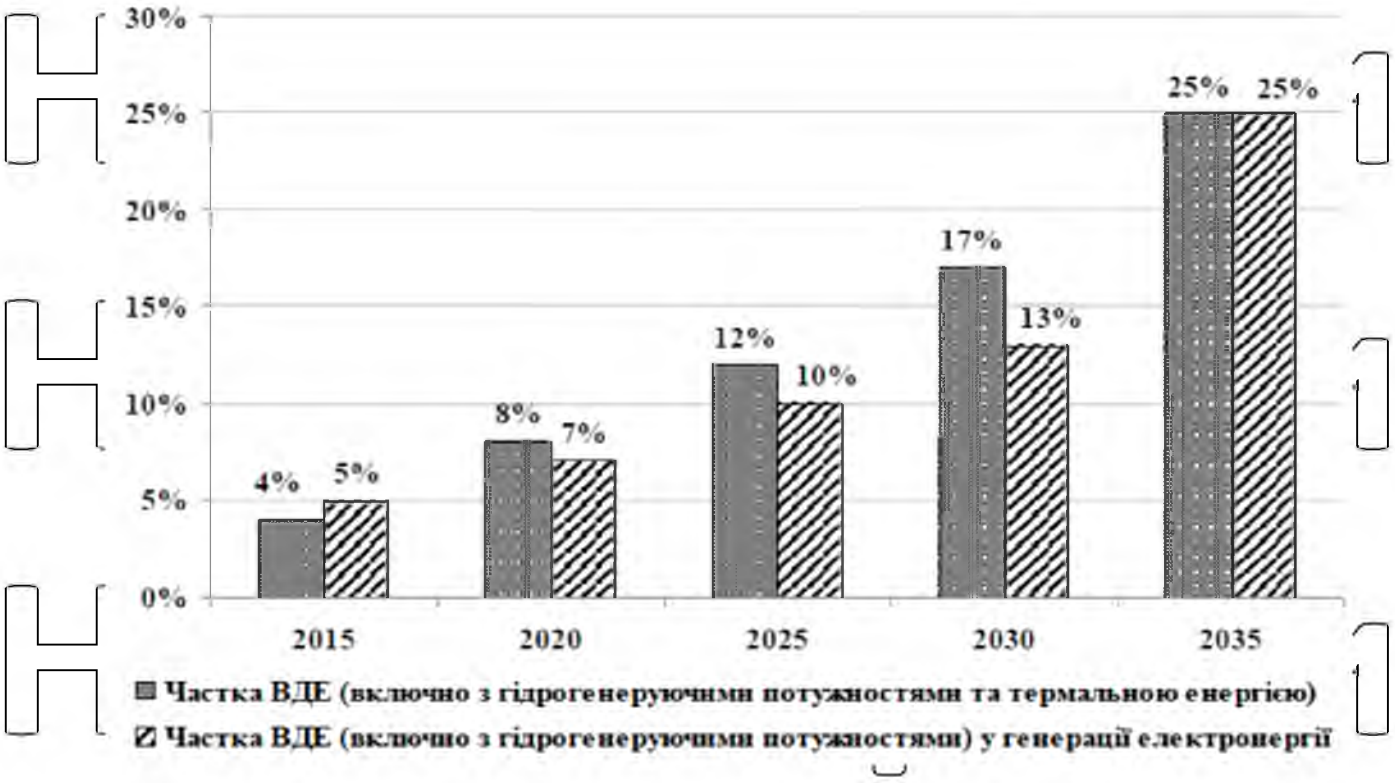


Рис. 4.2. Прогноз зростання частки ВДЕ відповідно до Енергетичноїстратегії України до 2035 р.

Щодо світових показників зростання частки відновлюваної енергетики, за даними Міжнародного енергетичного агентства, спостерігалось збільшення частки відновлюваної енергії у світовій генерації електроенергії до 26% у 2020 році у порівнянні з 22% у 2013 році. Починаючи з 2018 р., біоенергетика є найбільшим джерелом зростання споживання відновлюваної енергетики і до 2025 року передбачається, що дана тенденція залишатиметься незмінною [65]. Відповідно до енергетичної стратегії, до 2035 року передбачено також поетапне зростання постачання первинної енергії в Україні у розрізі галузей відновлювальної енергетики (рис. 5.8). Так, згідно з прогнозом, сумарна частка відновлюваної енергетики у загальному постачанні первинної енергії в Україні у 2035 році становитиме 25%, а 11,5 відсотка первинного енергопостачання України планується забезпечити за рахунок біомаси, біопалива і відходів.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

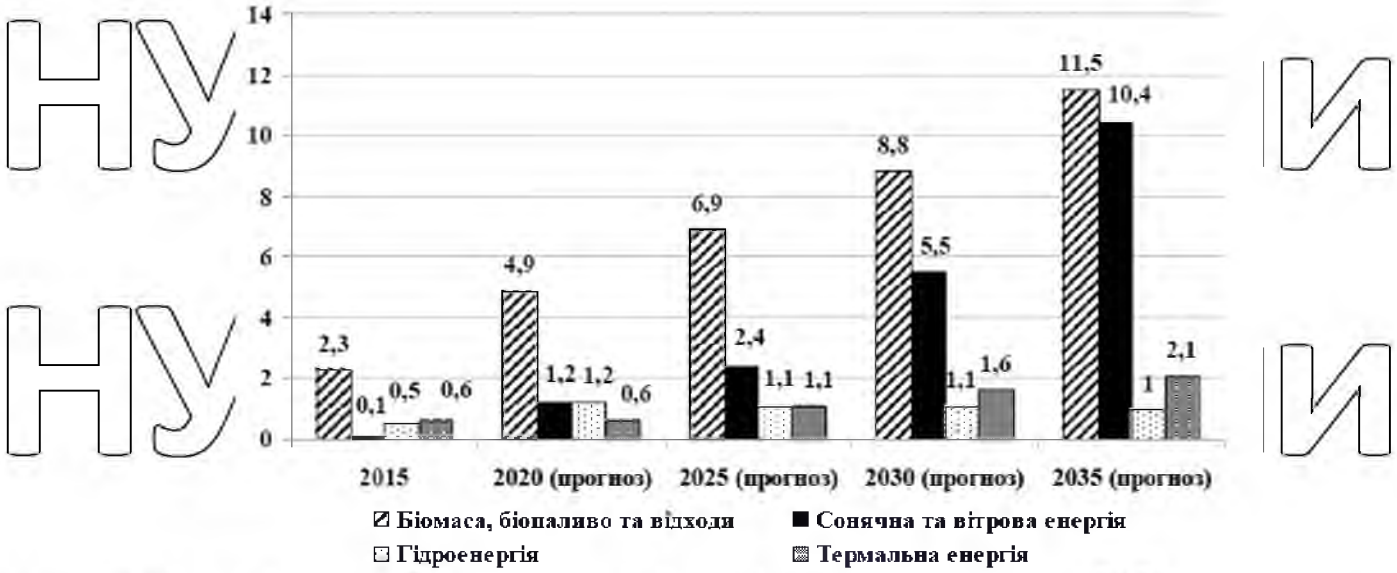


Рис.4.3. Прогнозна структура загального постачання первинної енергії в Україні у галузі біоенергетики відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 р.

Такі амбітні цілі пов'язані з прагненням України інтегруватися до Європейського Союзу [44]. Важливими компонентами цієї інтеграції є співпраця в енергетичній сфері та розвиток відновлюваної енергетики. Європейська стратегія енергетичної безпеки 2014 року [45] встановлює цільове значення відновлюваної енергії 27 відсотків до 2030 року. У попередній Директиві 2009/28/ЄС було встановлено цільове значення відновлюваної енергії – 10 відсотків транспортної енергії до 2020 року.

Розвиток біопалив в Україні є одним із нагальних завдань, що обумовлено рядом об'єктивних факторів. По-перше, як визначає Г. Калетнік, виробництво та споживання біопалив здатне забезпечити сільське господарство власними енергетичними ресурсами та знизити виробничі витрати на паливні ресурси. Крім цього, однією з вимог Європейського Союзудо країн-кандидатів є рівень використання відновлюваних джерел енергії не нижчий за середньоєвропейський [51].

По-друге, Україна має великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії, загалом та рідкого біопалива, зокрема. Згідно з даними Міністерства економічного розвитку і торгівлі України, із загального експорту України частка аграрної продукції становить 48%. Основною часткою аграрного експорту є зернові та олійні культури (48% і 23% відповідно) [20]. Натомість

частину експорту сировини доцільно перепрофілювати на виробництво біопалива.

По-третє, світовий досвід переконує, що виробництво біопалива – сприятлива можливість для економіки кожної країни, що дає змогу створювати нові робочі місця не тільки в сільській місцевості, а й у промислових центрах, поліпшує екологічну ситуацію в країні, регіонах тощо. За оцінками М. Габреля, на 1 тис. т нафтового еквівалента біопалива створюються 16 робочих місць, переважно в сільській місцевості; кожен відсоток біопалива у загальному споживанні палива створюватиме від 45 до 75 тис. нових робочих місць у сільській місцевості [3].

Для України розвиток галузі виробництва біопалив як стратегічно важливої галузі залежить від впливу багатьох факторів. Задля оцінки потенціалу виробництва рідкого біопалива з сільськогосподарських культур в Україні нами було використано сценарний аналіз. Сценарії – це ймовірні ситуації, які необхідно проаналізувати [67]. Можливі сценарії розвитку галузі виробництва біопалив проаналізуємо у таблиці 5.2.

Три сценарії базуються на історичних та поточних цілях, які Україна встановила щодо виробництва біопалива. Дж. Маак зазначає: «Аналіз сценаріїв використовувався приватним сектором протягом останніх 25 років для управління ризиками та розробки надійних стратегічних планів в умовах невизначеного майбутнього. Сценарії допомогли установам державного сектору спланувати зростання населення та регіональний розвиток» [57]. Побудова сценаріїв часто передує розробці стратегії розвитку досліджуваної системи або має на меті тестування та поліпшення уже розробленої стратегії. Окрім того, сценарії будують у дослідницьких цілях – для вивчення різноманітних ситуацій, у яких може опинитися досліджувана система у майбутньому [67].

У 2019 році споживання дизпалива становило 7 млн тонн, бензину – 2 млн тонн [21]. Розрахуємо необхідні обсяги виробництва біопалива для кожного з сценаріїв, враховуючи фактичні дані споживання нафтового палива в Україні (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Сценарії частки біопалива у споживанні транспортного палива в Україні до 2035 року

Сценарій А	Сценарій В	Сценарій С
11,5%	7%	5%
230 тис. т бензину 805 тис. т дизельного палива	140 тис. т бензину 490 тис. т дизельного палива	100 тис. т бензину 350 тис. т дизельного палива

Враховуючи дані щодо споживання дизельного палива та бензину в Україні у 2019 році (7 млн т дизельного палива та 2 млн т бензину), обсяги посівних площ, необхідних для досягнення цілей у Таблиці 5.3, представлені у Таблиці 5.4. Вони розраховані за умови, що частка врожаю, призначеного для виробництва біопалива, однакова для всіх сільськогосподарських культур (однак враховане попереднє співвідношення посівних площ). Вихід біоетанолу та біодизелю із сільськогосподарських культур конвертується за використанням коефіцієнтів перерахунку Г.М. Калетніка [51]. Коефіцієнти складають 0,3002, 0,3121 і 0,0790 тонни біоетанолу з 1 тонни кукурудзи, пшениці та цукрових буряків; 0,3696, 0,1760 і 0,3520 тонни біодизелю з тонни ріпака, сої та соняшнику. Враховуючи ці припущення і розрахунки, цілі для сценаріїв виробництва біопалив в Україні можна досягти, використавши під вирощування біоенергетичних культур з подальшою переробкою на біопалива 1507,14 тис. га (сценарій А), 917,61 тис. га (сценарій В), 655,03 тис. га (сценарій С) або 5,47, 3,33, 2,3% від середніх посівних площ під вирощування сільськогосподарських культур у 2020-2025 рр.

Вирощування зернових та олійних культур в Україні значною мірою є експортоорієнтованим. Серед країн, представлених у Таблиці 4.3, в України найвища частка експорту кукурудзи і пшениці. Експорт агропромислової продукції та продукції харчової промисловості у 2018 р. склав 18,8 мільярда дол. США та 33 відсотка від вартості всього експорту з України. Експорт соняшникової олії, пшениці, кукурудзи і сої становив відповідно 24, 17, 15 і 6

відсотків українського експорту аграрних і харчових продуктів. У випадку якщо Україна не бажатиме відмовлятися від експорту як від джерела іноземної валюти для розвитку своєї біоенергетичної галузі, необхідно буде збільшити виробництво сільськогосподарських культур, щоб досягти мети з виробництва біопалива.

Таблиця 4.3

Розрахунок площ для досягнення цілей України у споживанні біопалива відповідно до сценаріїв

Культура	Середня посівна площа, 2015-2020, (тис. га)	Середня урожайність, 2015-2020 (т/га)	Вихід біоетанолу, т/га	Сценарій А: 230 тис. т бензину, 805 тис. т дизельного палива	Сценарій В: 140 тис. т бензину, 490 тис. т дизельного палива	Сценарій С: 100 тис. т бензину, 350 тис. т дизельного палива
				Площа для досягнення цільового рівня біопалива для транспортного палива (тис. га)		
Виробництво біоетанолу						
Кукурудза	4556,85	6,43	1,93	58,33	35,54	25,06
Пшениця	6666,9	3,97	1,24	85,34	52,00	36,67
Цукрові буряки	262,9	47,01	3,71	3,37	2,05	1,45
Всього на виробництво біоетанолу				147,03	89,60	63,18
Виробництво біодизелю						
Рілак	948,7	2,67	0,99	90,70	55,21	39,47
Соя	7482,6	2,17	0,38	715,34	435,49	311,28
Соняшник	3795,75	2,27	0,8	554,07	337,31	241,10
Всього на виробництво біодизелю				1360,11	828,01	591,85
Всього на виробництво рідкого біопалива відповідно до сценаріїв				**1507,14**	**917,61**	**655,03**
Загальна посівна площа у 2015-2020 рр., тис. га				%	%	%
27546,76				5,47	3,33	2,38

За даними Державної служби України з геодезії, картографії та кадастру, площа сільськогосподарських земель, які на даний час не обробляються, становить 5,2 мільйона гектарів [19]. Обсяг біопалива, що можна отримати після переробки сільськогосподарських культур, що вирощуватимуться на цихземлях, розраховується, виходячи з припущення, що:

астка незадіяних земель, засіяних кукурудзою, пшеницею, цукровим буряком,

ріпаком, соняшником і сою, дорівнює структурі площ оброблюваних земель у

рожайність для необроблюваних земель дорівнює середній врожайності оброблюваних земель в 2015-2020 рр.;

коефіцієнти перетворення біопалива такі ж, як в Таблиці 4.5. Враховуючи ці припущення, з незадіяних на теперішній момент земель (5,2 млн га) можна отримати 3647,57 тис. т біоетанолу та 1702,58 тис. т біодизельного палива (табл.

Таблиця 4.4

Розрахунок обсягів виробництва біопалива із земель, що не обробляються в Україні

Культура	Середня посівна площа, 2020-2025, (тис га)	% від загальної площі	Вихід біоетанолу, т/га	Посівна площа у розрахунку на незадіяні землі, тис. га	Виробництво біопалива, тис. т
Виробництво біоетанолу					
Кукурудза	4556,85	17,72	1,93	921,52	1778,53
Пшениця	6666,9	25,93	1,24	1348,23	1671,80
Цукрові буряки	262,9	1,02	3,71	53,17	197,24
Виробництво біодизелю					
Ріпак	948,7	3,69	0,99	191,85	189,93
Соя	7482,6	29,10	0,38	1513,18	575,01
Соняшник	5795,75	22,54	0,8	1172,06	937,64
Всього	-	100	-	5200,00	5350,16

Інша стратегія – підвищення врожайності сільськогосподарських культур на орних землях. У таблиці 4.5 наведено порівняння середньої врожайності шести культур (кукурудза, пшениця, цукрові буряки, ріпак, соя, соняшник), що можуть бути використані в якості сировини для виробництва біопалива для 10 основних сільськогосподарських виробників і країн- експортерів. За показниками урожайності Україна не перебуває на лідируючих позиціях з жодної

вирощуваної культури. У випадку підвищення урожайності Україна може переробляти додаткові обсяги виробництва сільськогосподарської продукції, не зменшуючи внутрішнє споживання та експорт сільськогосподарської продукції. Таким чином, стратегія збільшення врожайності може стати виходом України на шляху до пошуку сировини для виробництва біопалива.

Таблиця 4.5

Урожайність основних сільськогосподарських культур для виробництва біопалива в основних країнах-виробниках або експортерах сільськогосподарської продукції, т/га, в середньому за 2020-2025 рр.

Культура / Країна	Кукурудза	Пшениця	Цукрові буряки	Ріпак	Соя	Соняшник
Аргентина	6,8	3,0	не вирощуються	3,0	2,0	2,1
Австралія	7,2	2,0	не вирощуються	2,4	1,4	1,4
Бразилія	5,1	2,5	не вирощуються	3,2	1,4	1,6
Канада	9,6	3,1	66,4	3,1	2,3	2,2
Китай	5,9	5,2	44,8	2,0	2,1	2,9
Франція	8,7	7,0	87,2	3,0	3,7	2,4
Казахстан	5,3	1,1	23,9	2,2	0,9	0,8
Україна	**6,7**	**4,0**	**47,1**	**2,7**	**2,2**	**2,3**
США	10,0	3,1	66,6	3,4	2,0	1,9

Україна – єдина країна у світі, що є потужним виробником сільськогосподарської продукції, яка з 2010 року скоротила виробництво рідкого біопалива. Проте в 2017 році Україна прийняла Енергетичну стратегію України до 2035 р., в рамках якої поставила за мету забезпечити до 2035 року 11,5% поставок первинної енергії з біомаси, біопалива та відходів. Більш того, Україна прагне до інтеграції в ЄС, який поставив собі за мету досягти частки поновлюваних джерел енергії 14 відсотків транспортної енергії з відновлюваних джерел енергії до 2030 року.

НУБіП України

Висновки до розділу 4

Встановлено, що найбільш дієвими заходами у контексті стимулювання виробництва та споживання біопалива у світі є інструменти тарифного та нетарифного захисту внутрішнього ринку від імпорту; норми обов'язкового мінімального вмісту біопалива в паливній суміші з традиційними енергоносіями та субсидування виробників біопалива (підтримка кінцевого виробництва); державна підтримка фундаментальних досліджень, прикладних розробок та пілотних проєктів (підтримка факторів виробництва); субсидування постачальників сировини, що використовується у виробництві біопалива; субсидування інфраструктури дистрибуції біопалива; податкові пільги, що підвищують споживчу привабливість біопалива в порівнянні з традиційними видами транспортного палива (підтримка дистрибуції і споживання).

Задля розвитку ринку рідкого, твердого та газоподібного біопалива на короткострокову, середньострокову та довгострокову перспективу подано ряд рекомендацій, що створить сприятливу нормативно-правову базу для розвитку виробництва, обігу та використання біопалива.

Задля оцінки потенціалу виробництва рідкого біопалива з сільськогосподарських культур в Україні нами було використано сценарний аналіз та розраховано необхідні обсяги виробництва біопалива для кожного з сценаріїв, враховуючи фактичні дані споживання нафтового палива в Україні. У результаті розрахунків було визначено, що цілі для сценаріїв можна досягти, використавши під вирощування біоенергетичних культур з подальшою переробкою на біопалива 1507,14 тис. га (сценарій А), 917,61 тис. га (сценарій В), 655,03 тис. га (сценарій С) або 5,47, 3,33, 2,3% від середніх посівних площ під вирощування сільськогосподарських культур у 2020-2025 рр.

Визначено, що аграрний сектор України є потенційним ресурсом для виробництва біопалива. Однак експортна орієнтація аграрного сектору України і пов'язані з цим прибутки в іноземній валюті не викликають бажання в

експортерів перенаправляти сировину на виробництво біопалива. З огляду на цю ситуацію, політичними варіантами досягнення цільового рівня біопалива в Україні є (1) залучення у виробництво біопалива 16 відсотків (5,2 млн га) сільськогосподарських земель, які зараз не обробляються, та (2) збільшення врожайності. Таким чином, для України існує можливість як розвивати індустрію біопалива, так і задовольняти свій експортний потенціал і внутрішні ринки шляхом використання необроблюваних земель задля виробництва сільськогосподарської продукції з подальшою переробкою на біопалива або розвивати програми селекції для підвищення врожайності.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

иконано аналіз сучасних методів і засобів зброджування біоорганічноїсировини з метою виробництва компостів в закритих камерах ферментації. Встановлено, що в камерах обертового типу якість отриманих компостів, за мікробіологічними параметрами, залежить від рівномірності змішування компонентів вихідного субстрату.

редставлено математичну модель, за допомогою якої можна встановити кутову швидкість камери ферментації обертового типу, при якій спостерігатиметься процес повного розосередження частинок компонентів по вільній поверхні сегменту субстрату, стікаючим з лопатки потоком.

кспериментальним шляхом встановлено, що при куті встановлення стаціонарної лопатки 24 градуси та ширині лопатки 28 мм повне розсіювання частинок компонентів по вільній поверхні сегменту субстрату буде спостерігатися при кутовій швидкості обертання камери в діапазоні ω=0,93…1,18 рад/с, що відповідає частоті обертання закритої камери ферментації рівній n=8,5…11,3 об/хв. Відхилення теоретичних та експериментальних даних не перевищує 5 %. Отримані результати дають змогу стверджувати про можливість застосування представленої моделі для виконання теоретичного моделювання параметрів роботи камери.

редставлено методику виконання енергетичного аналізу закритої камери ферментації. Встановлено, що підвищення температури та виділення теплоти обумовлюються процесами деградації органічної речовини. Найвища швидкість тепловиділення спостерігається при максимальному значенні температури 66,7

Близько 93% виробленої в процесі компостування теплоти виділяється в навколишнє середовище. З них 97 % тепловтрат спричинені втратами через поверхні камери конвекційним та радіаційним випромінюванням; з них – 69 % через циліндричний корпус та 28 % через торцеві поверхні. І лише 2% теплоти втрачається в процесі аерації.

изначено, що аграрний сектор України є потенційним ресурсом для виробництва біопалива. Однак експортна орієнтація аграрного сектору України і пов'язані з цим прибутки в іноземній валюті не викликають бажання в експортерів перенаправляти сировину на виробництво біопалива. З огляду на цю ситуацію, політичними варіантами досягнення цільового рівня біопалива в Україні є (1) залучення у виробництво біопалива 16 відсотків (5,2 млн га) сільськогосподарських земель, які зараз не обробляються, та (2) збільшення врожайності. Таким чином, для України існує можливість як розвивати індустрію біопалива, так і задовольняти свій експортний потенціал і внутрішні ринки шляхом використання необроблюваних земель задля виробництва сільськогосподарської продукції з подальшою переробкою на біопалива або розвивати програми селекції для підвищення врожайності

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

16–34.

179–190. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.01.012

2612–2628.

ідновлювана енергетика в аграрному виробництві : навч. посіб. /За ред. Скидана О. В., Голуба Г. А. Київ : НУБіП України, 2018. 338 с.

770–779. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.111

829–834.

121–131.

a

d

v

e

M

804–212,https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.028

265–272.

6450–1455.

a 1):1, 1–8. DOI: 10.26789/AEB.2015.01.003

i

u

579–590.

ягушняк, Г. С., Анохіна, К. В. (2015). Енергоефективнітехнологічні процеси та обладнання біоконвеєрів : монографія. В.: ВНТУ, 148 с.

u

s

.

атушняк, Г. С., Кощеєв, І. А. (2014). Моделювання теплових процесів енергоефективного біореактора з сонячним колектором. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2, 120–123.

ерещук М. Б., Вознюк М. О. (2020). *Енергетичний аналіз реактора барабанного типу:* матеріали наук.-практ. конф., м. Житомир, 26 жов. 2020 р. Житомир : ПНУ, 2020. С. 57–62.

ерещук М. Б., Вознюк М. О. (2020). *Моделювання процесу біоконверсії рослинної сировини в закритій камері:* матеріали наук.-практ. конф., м. Житомир, 26 жов. 2020 р. Житомир : ПНУ, 2020.

ивенкова, Н.М., Голубенко, А.А., Терещук, М.Б., Вознюк, М.О. Дослідження процесу аеробної твердофазної ферментації субстрату зорганічної сировини. Органічне виробництво і продовольча безпека : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. Житомир, 2020.С. 95–98.

ф

аламаренко Я.В. Адитивна модель оцінювання рівня стратегічного розвитку підприємств спиртової промисловості на основі методики PESTEL-FAMIL(Y)-аналізу. Економіка та суспільство. № 13. С. 265-270.

йахтій Т.Ф., Драчук В.Ю. Законодавче регулювання податкового стимулювання вирощування біоенергетичних культур, виробництва і використання біопалива. Зб. наук. праць Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. К., 2013. Вип. 19. С. 235-239.

ришляк Н.В. Реалізація стратегії виробництва біопалив із сільськогосподарських культур і відходів. Інвестиції: практика та досвід. 2021. № 12. С. 29-37.

ро внесення змін до деяких законодавчих актів України (щодо розвитку сфери використання рідкого біопалива (біокомпонентів): Проект Закону звернення 28.03.2021 р.).

с

р

йменко В.В. Регіональний аспект формування енергетичної безпеки держави.

т

а

М

і

Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер.: Економічні науки. 2014. № 7 (2). С. 71-74.

інченко В.М., Гументик М.Я., Бондар В.С. Законодавче регулювання розвитку біоенергетики в Україні та адаптація його до законодавства Європейського Союзу. Біоенергетика. 2015. № 2. С. 8-11.

окарчук Д.М. Стратегічні напрями виробництва біопалива сільськогосподарськими підприємствами України. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2016. № 7. С. 18-26.

окарчук Д.М. Управління ефективним використанням сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу. Облік і фінанси. 2018. № 3 (81). С. 133-139.

риполська Г.С. Субсидування виробництва та споживання моторного біопалива. Економіка АПК. 2020. № 11. С. 28-33.

весик М.А., Обиход Г.О. Новітній вимір екологічних викликів та загроз сталому розвитку в епоху глобалізації. Економіка природокористування і сталий розвиток. 2018. № 3-4 (22-23). С. 5-18.

одаківська О.В., Климчук О.В. Державне регулювання конкурентоспроможного виробництва біопалив: світовий досвід та дороговкази для України. Альтернативні джерела енергії у підвищенні енергоефективності та енергонезалежності сільських територій : колективна монографія; за ред. І.О. Яснолоб, Т.О. Чайки, О.О. Горба. Полтава : Видавництво ПП «Астрая», 2019. С.

одаківська О.В., Шпикуляк О.Г. Інститути «зеленої» економіки у забезпеченні сталого розвитку агросектору: теоретичний вимір. Бізнес- Інформ. 2017. № 9. С.

орнолищук Т.І. Державне регулювання розвитку виробництва та споживання біопалив в Україні. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2016. № 11. С. 92-102.

ибаєва І.В. Визначення та принципи регуляторної політики. Економічний аналіз: зб. наук. праць. Тернопільський національний економічний університет. 2014. Том 18. № 1. С. 14-119.

НУБіП України

пичак О.М., Боднар О.В. Енергетичний підхід щодо оцінки трансформацій в сільському господарстві через призму фізіократичних поглядів у контексті інноваційних процесів. Економіка АПК. 2015. № 10. С. 5-16.

пичак О.М., Боднар О.В. Теоретичні основи біоенергетики в контексті закону збереження енергії. Економіка АПК. 2019. № 8. С. 6-16.

пичак О.М., Боднар О.В., Пашко С.О. Виробництво біопалива в Україні у контексті оптимального вирішення енергетичної проблеми. Економіка АПК. 2019. № 3. С. 13-27.

ербина С.В. Інституційна трансформація механізму державного регулювання аграрного та сільського розвитку України. Наукові записки Інституту законодавства Верховної Ради України. 2016. № 2. С. 127-134.

(дата звернення 12.04.2021 р.).

niev S.V., Bashtovyi A.I. Main trends and prospects for the development of transport biofuels market in the EU and Ukraine. Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2020. V. 42. № 1. P. 69-76.

(дата звернення 10.03.2021 р.).

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

ДОДАТКИ

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

Додаток А

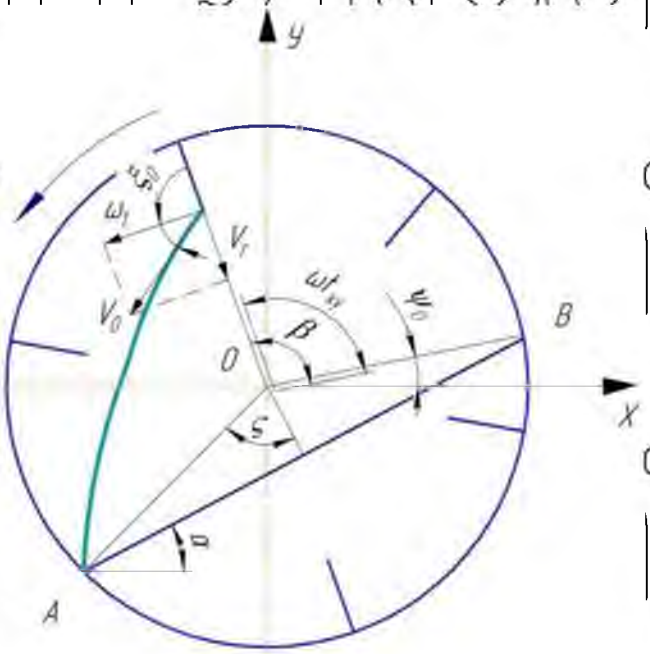


Рис. 1А. Поперечний переріз закритої камери ферментації з траєкторіюруху компонентів субстрату по лопаткам камери

Додаток Б

Таблиця 1

Дані для розрахунку енергетичних параметрів [3]

Параметри	Значення	Одиниці вимірювання
Ущільнюючий матеріал – скловолокно		
Товщина, $(r_3–r_o)$	0,02	м
Теплопровідність, $K_{із}$	0,038	Вт/(м·°С)
Товщина, L	0,9	м
Сталевий барабан реактора		
Діаметр, $2r_o$	0,550	м
Довжина, $l_{обч.пов.}$	1,0	м
Товщина, (r_o-r_i)	0,008	м
Питома теплоємність, $C_{рз}$	490	Дж/(кг·°С)
Теплопровідність, $K_з$	46,0	Вт/(м·°С)
Матеріал, що компостується (субстрат)		
Маса, m_c	55	кг
Питома теплоємність, $C_{рс}$	1585	Дж/(кг·°С)
Аерація (кількість повітря, необхідна для процесу компостування)		
Маса повітря, $m_{пов}$	0,004	м³/хв
Питома теплоємність, $C_{пов}$	1007	Дж/(кг·°С)

Густина,	1,177	кг/м^3
Кінетична в’язкість,	$1,57 \cdot 10^{-5}$	м^2/с
Теплопровідність, $K_{пов}$	0,0265	Вт/(м·°С)

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

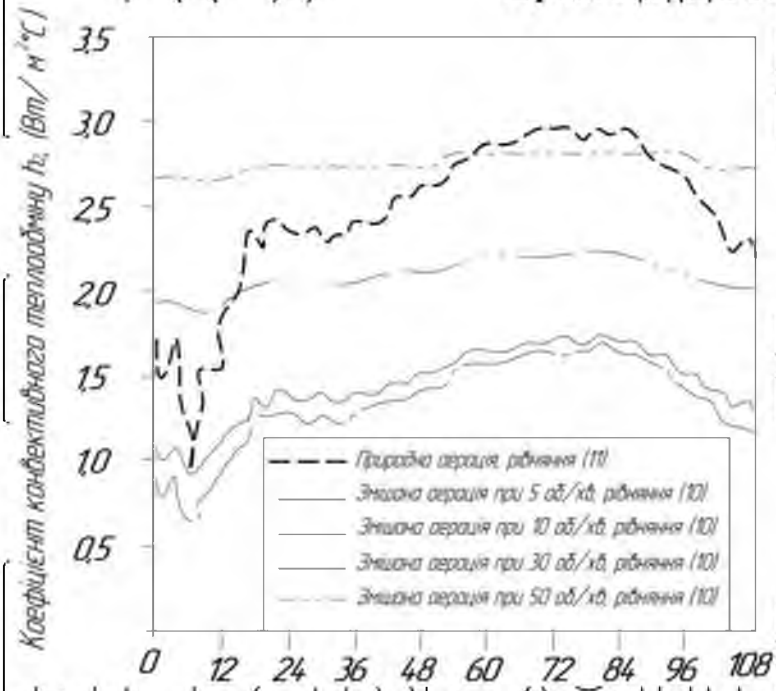


Рис. 1.Б. Коефіцієнт конвективного теплообміну для зовнішньої циліндричної поверхні камери h_2 (Вт/м$^{2\cdot}$°С), визначений для умов змішаної (рівняння 2.21) та природної конвекції (рівняння 2.22).

Додаток В

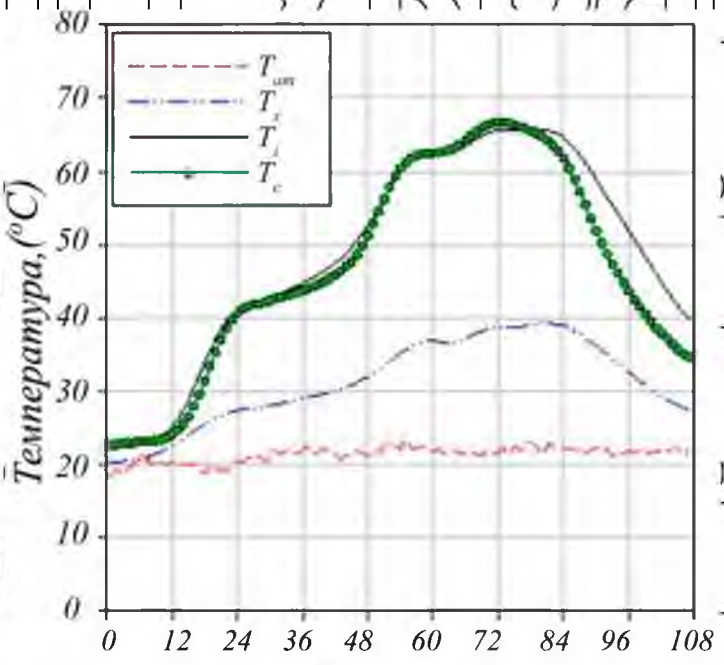


Рис. 1.В. Зміна температури атмосферного повітря (T_{am}), поверхні зовнішніх стінок камери (T_s), поверхні внутрішніх стінок камери (T_i) та субстрату (T_c) від часу протікання процесу ферментації

Додаток Г

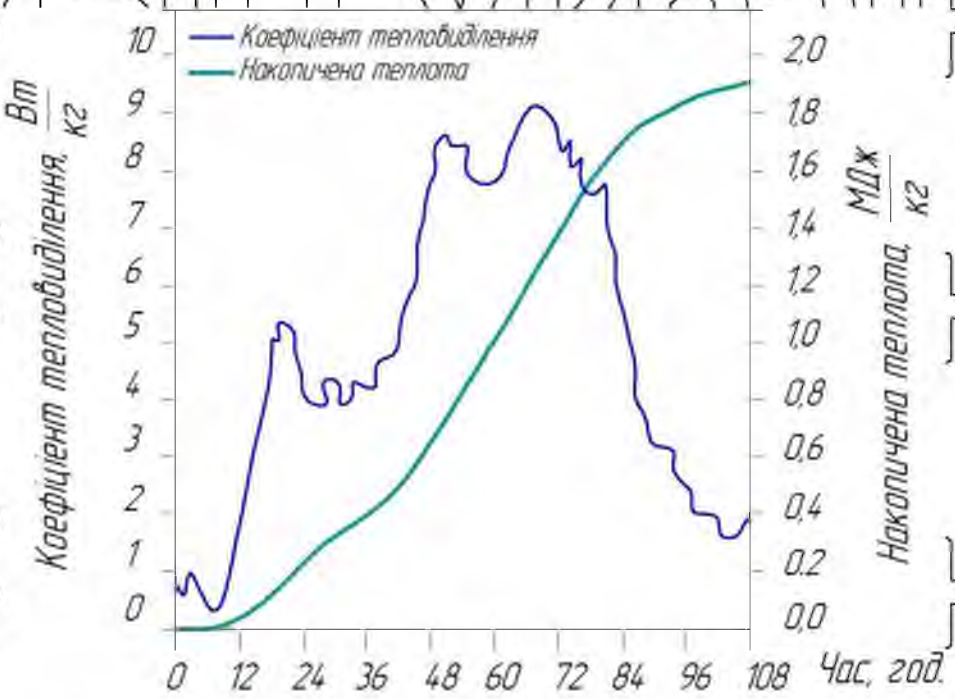


Рис. 1.Г. Залежність зміни коефіцієнта тепловиділення та кількості накопиченої теплоти від часу протікання процесу ферментації

Додаток Д

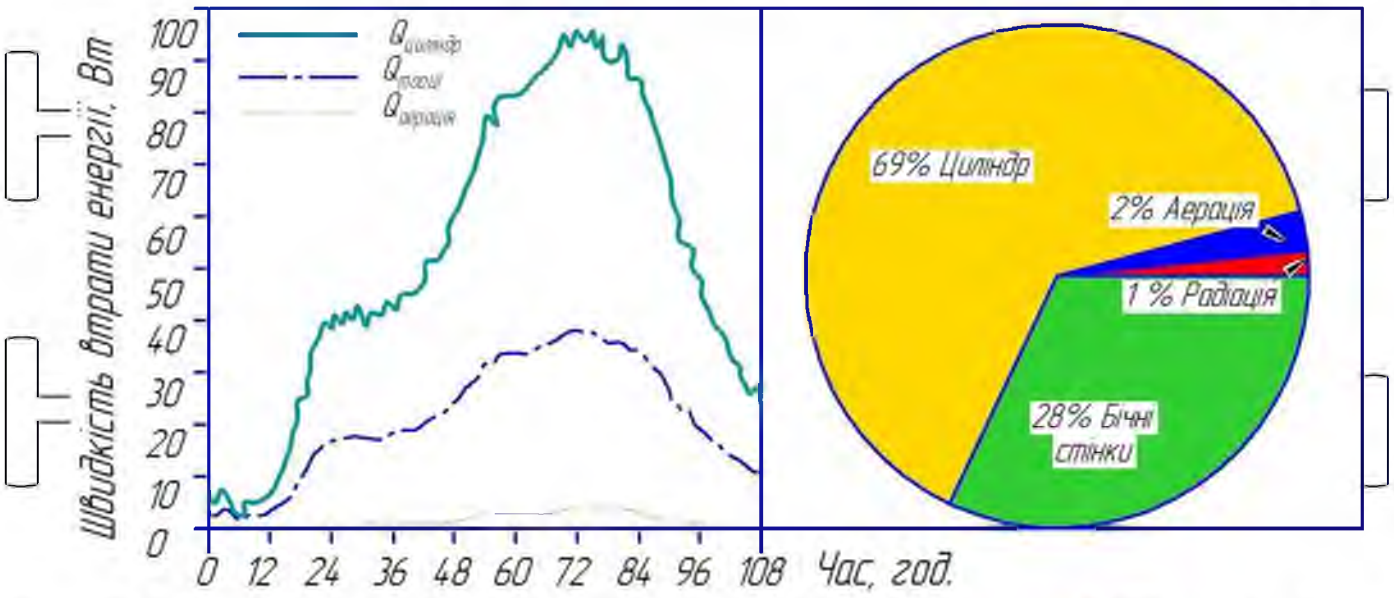
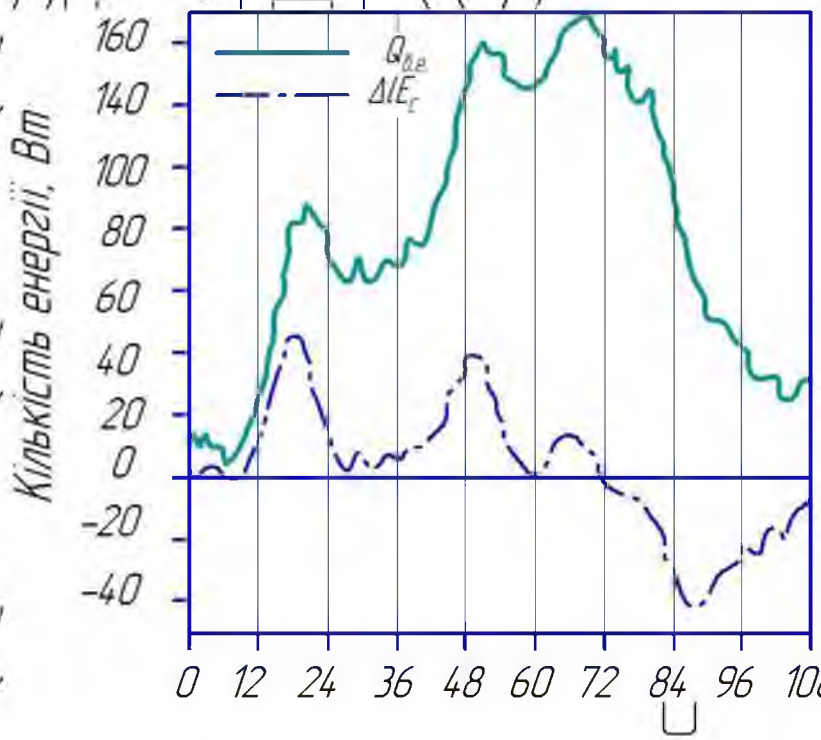


Рис. 1.Д. Залежність втрат енергії (через конвекційне, радіаційне випромінювання та через процес аерації) від тривалості протікання процесу ферментації

Додаток Ж



НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

Рис. 1.Ж. Залежність зміни внутрішньої енергії Δ і кількості субстрату

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

вивільненої енергії $Q_{вв}$ через метаболічну активність субстрату від часу протікання процесу ферментації

Додаток З

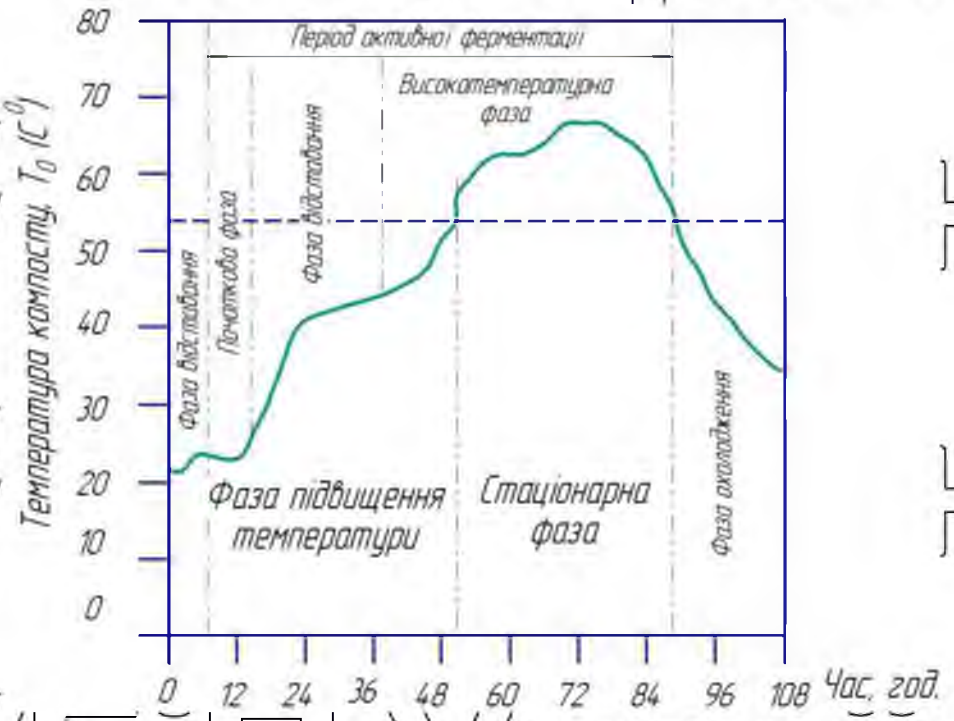


Рис. 1.3. Залежність температури субстрату від фази процесу ферментації.

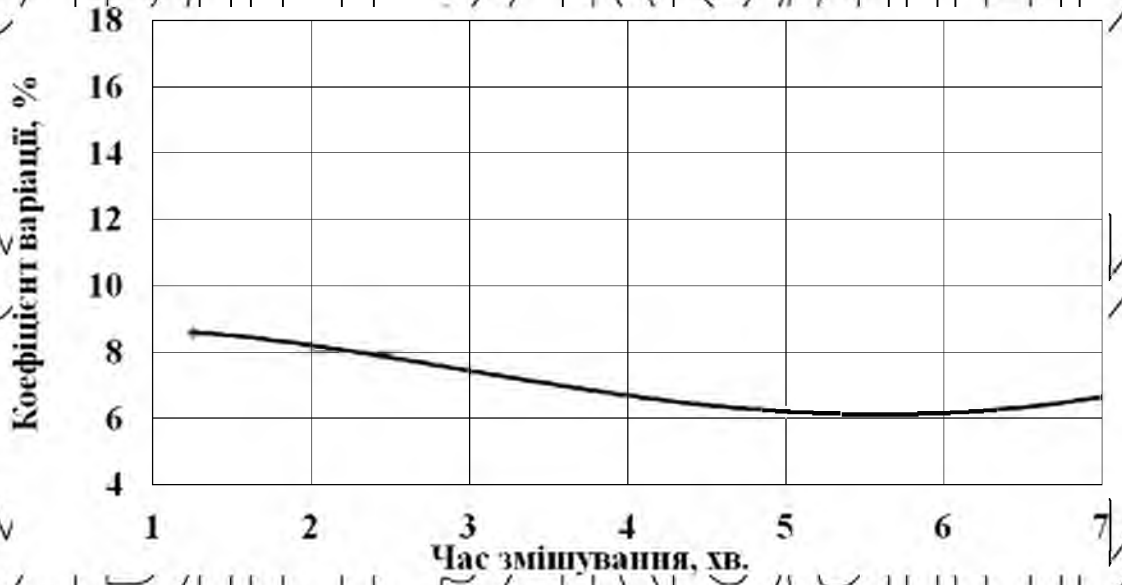


Рис. 1.И. Залежність якості змішування компонентів у субстраті від часу змішування при частоті обертання камери ω =1,05 рад/с, ступеню заповнення камери субстратом 50% вмісті контрольного компоненту в суміші 3%

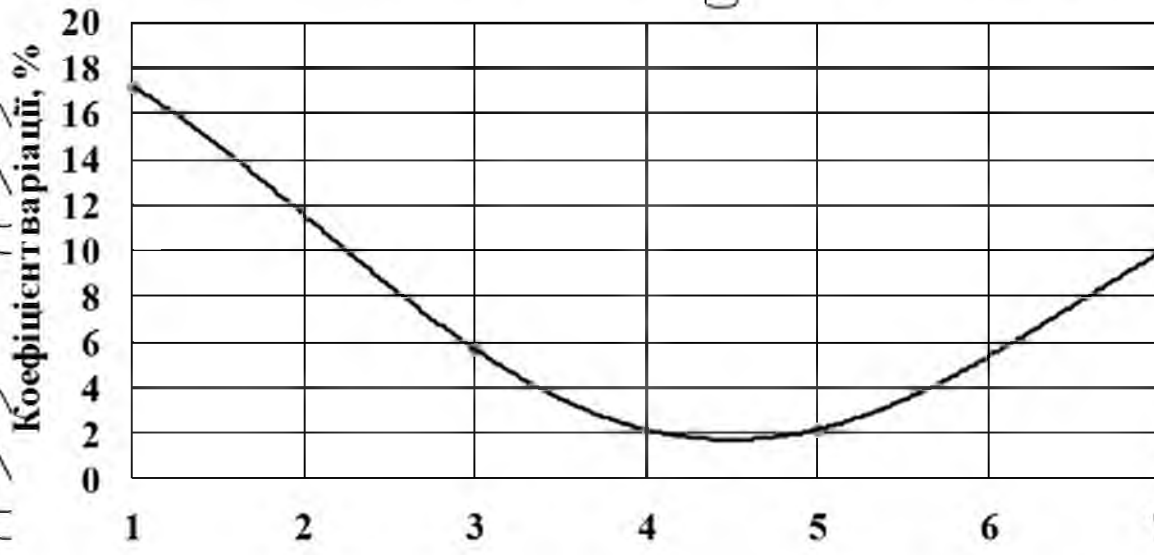


Рис. 2.И. Залежність якості змішування компонентів у субстраті від вмісту контрольного компоненту в субстраті при частоті обертання ω =1,05 рад/с, ступеню заповнення камери субстратом 50%, часу змішування5 хв

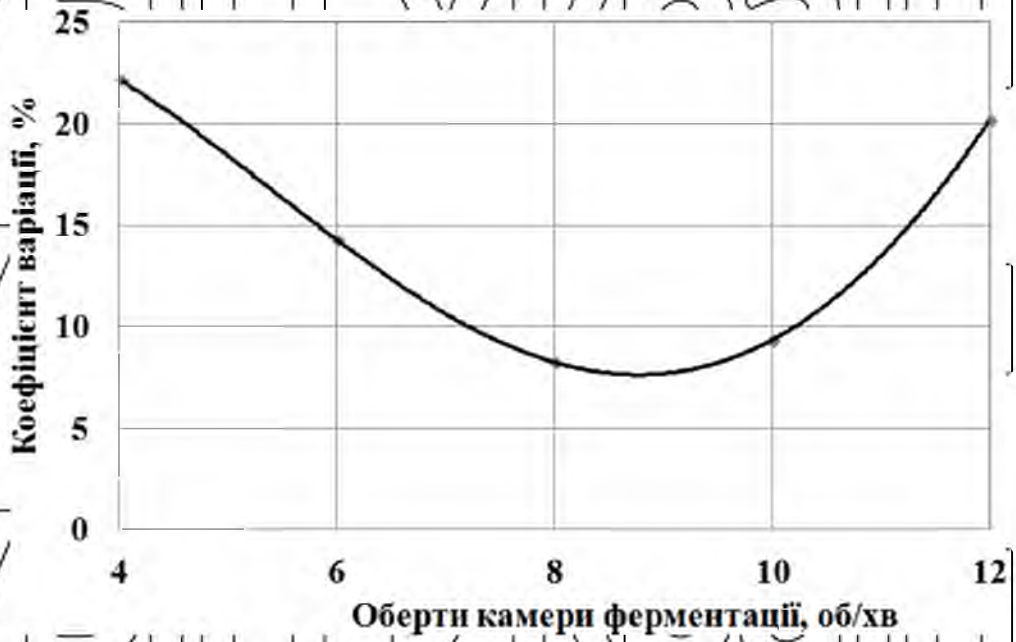


Рис. 3И. Залежність якості змішування компонентів у субстраті від зміни кутової швидкості обертання камери ферментації Отже рекомендований діапазон значень кутової швидкості камери рівний ω =0,93…1,18 рад/с, що відповідає частоті обертання закритої камери ферментації рівній n=8,5…11,3 об/хв.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України