

Житомирський національний агроекологічний університет
Національний університет біоресурсів
і природокористування України

С. М. КУХАРЕЦЬ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
АВТОНОМНОСТІ АГРОЕКОСИСТЕМ.
МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ**

МОНОГРАФІЯ

Житомир – 2016

УДК 631.147:631.371
ББК 40.74
К95

Рекомендовано Вченою радою Житомирського національного агроекологічного університету (протокол № 1 від 19 лютого 2016 р.).

Рецензенти:

Надикто В. Т. – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН України, Таврійський державний агротехнологічний університет;

Кудря С. О. – доктор технічних наук, професор, Інститут відновлювальної енергетики Національної академії наук України;

Тищенко С. С., – доктор технічних наук, професор, Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет.

К95 Кухарець С. М. Підвищення енергетичної автономності агроecosystem. Механіко-технологічні основи: монографія / С. М. Кухарець – Житомир : ЖНАЕУ, 2016. – 192 с.

ISBN 978-966-8706-76-9

У монографії обґрунтовано механіко-технологічні основи формалізації структури агроecosystem на основі оптимізації взаємозв'язків між елементами агроecosystem у визначеному діапазоні умов. Приведені принципи удосконалення обладнання для виробництва біоенергоресурсів шляхом мінімізації його енергоємності при збереженні якісних показників технологічних процесів.

Монографія призначена для наукових співробітників, аспірантів, конструкторів техніки, студентів та фахівців сільського господарства та енергетики.

УДК 631.147:631.371
ББК 40.74

© С.М. Кухарець, 2016

© Житомирський національний

агроекологічний університет, 2016

ISBN 978-966-8706-76-9

ВСТУП

Сучасні економічні реалії спонукають сільськогосподарське виробництво шукати шляхи до зменшення використання викопних видів палива. Цього можна досягти підвищуючи енергетичну ефективність функціонування технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві та використовуючи сировину власного виробництва для отримання енергії.

Сільськогосподарські підприємства можуть виробляти газоподібне паливо – біогаз; рідке паливо – дизельне біопаливо, біоетанол; тверде паливо – солому, бадилля, а також паливні гранули та брикети на їх основі. Використання палива, отриманого безпосередньо у ході сільськогосподарської діяльності, дає змогу частково замінити покупні енергоресурси. Тому, для підвищення енергетичної ефективності сільськогосподарського виробництва необхідна оптимізація технологічних процесів та обґрунтування і вибір раціональних параметрів машин та обладнання, що використовуються у ході виробництва та споживання біопалива. Вибір раціональних параметрів обладнання для підвищення рівня енергетичної автономності агроєкосистем має проводитись із міркувань зниження енерговитрат із дотриманням необхідних параметрів якості біопалива та енергії, що виробляється в результаті операції чи процесу.

З огляду на потребу забезпечення населення продуктами харчування та зважаючи на необхідність залучення частини потужностей аграрного виробництва для отримання біопалива, обладнання для отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження необхідно представити як елемент агроєкосистеми – комплекс отримання енергії, причому функціонування елементів такого комплексу має відбуватися за енергозберігаючими технологіями. Для цього необхідно розв'язати наукову проблему удосконалення технічних засобів для підвищення енергетичної автономності агроєкосистем при одночасному підтриманні рівня виробництва продуктів харчування та збереження родючості ґрунтів.

Щиру подяку автор висловлює науковому консультанту – доктору технічних наук, професору Голубу Геннадію Анатолійовичу та ректору ЖНАЕУ, доктору економічних наук, професору Скидану Олегу Васильовичу.

Автор висловлює щиру подяку своїм колегам та друзям – Шелудченку Богдану Анатолійовичу, Білецькому Віктору Романовичу, Шубенку Владиславу Олексійовичу, Медведському Олександровичу Васильовичу, Драгнєву Семену Васильовичу, Ярошу Ярославовичу Дмитровичу, Чубі В'ячеславу Володимировичу, Павленку Максиму Юрійовичу, Ачкевич Оксані Миколаївні, Переходьку Олексію Яковичу і звичайно ж своїй дружині Валентині, без допомоги яких цю роботу неможливо було б виконати.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА СТАНУ КОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ В ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ

1.1. Аналіз можливостей підвищення енергетичної автономності агроєкосистеми

Функціонування агроєкосистем вирішує такі завдання: забезпечення населення продуктами харчування або продовольча задача; забезпечення власного виробництва, а також інших технологічних процесів та побутових потреб енергетичними ресурсами або енергетична задача; утримання біологічного розмаїття форм життя й збереження навколишнього середовища або екологічна задача [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Сучасне сільськогосподарське виробництво частково вирішує продовольчу задачу за рахунок ефективного виробництва продукції рослинництва (рис. 1.1) [10, 11].

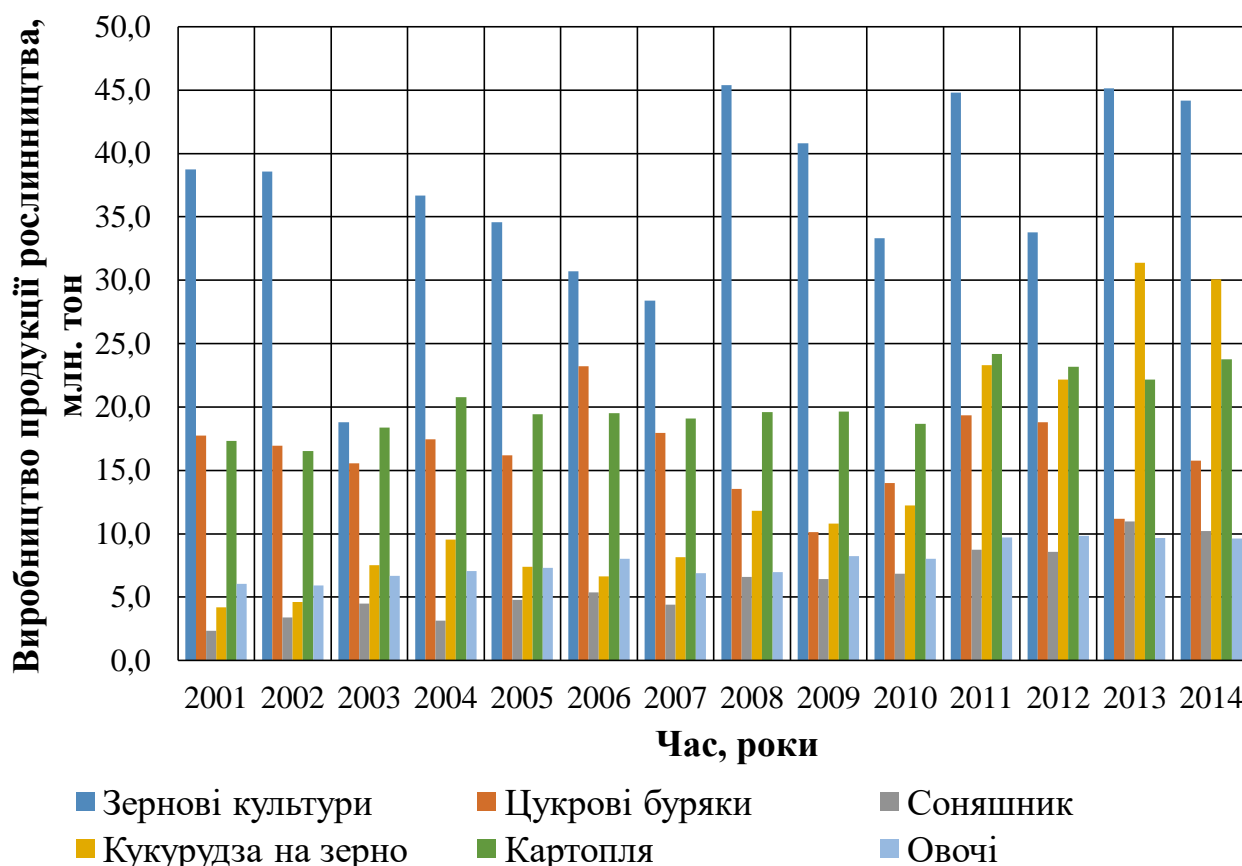


Рис. 1.1. Виробництво продукції рослинництва (без кормових культур)

Проте, галузь тваринництва, яка є достатньо енергомісткою, в останні роки відчуває нестачу енергоресурсів, що приводить до зниження виробництва продукції тваринництва, особливо вирощування та утримання ВРХ (рис. 1.2).

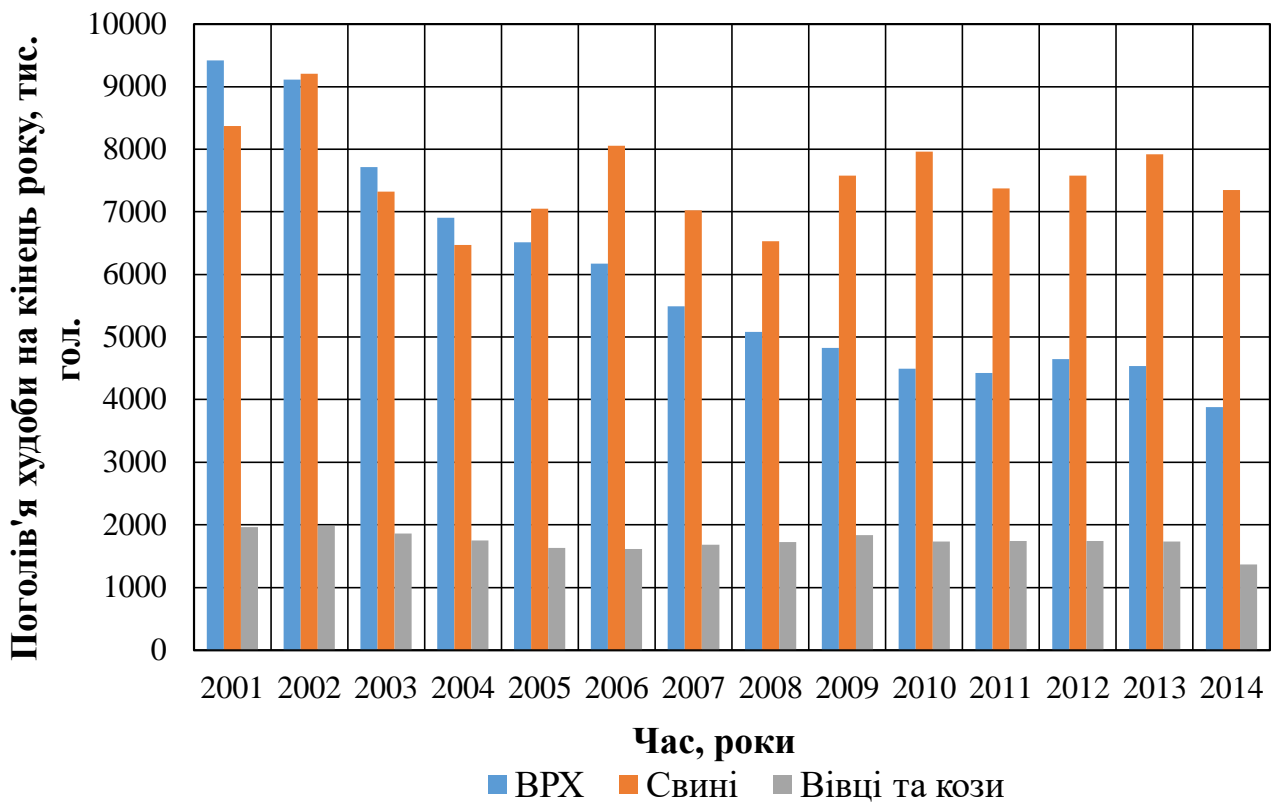


Рис. 1.2. Динаміка поголів'я тварин

Вирощування птиці та виробництво яєць, має тенденцію до зростання за рахунок менших питомих енерговитрат, відносно вирощування та утримання свиней чи ВРХ (рис. 1.3). Крім того, рівень забезпечення аграрного виробництва енергією із власної сировини є низьким. Так, наприклад, галузь тваринництва України, виробляючи значні обсяги органічних відходів, потенційно володіє значними ресурсами для виробництва біогазу [12, 13, 14], а рівень виробництва біогазу становить 1,2 % від економічно можливого (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

**Потенціал виробництва біогазу в тваринництві
(в середньому за 2008-2014 рр.)**

Джерело сировини	Загальний обсяг сировини для виробництва біогазу тис. т	Потенціал виробництва біогазу, млн. м ³ /рік	Виробляється біогазу, млн. м ³ /рік	Використання потенціалу виробництва біогазу, %
Ферми ВРХ	15431,6	385,8	4,4	1,1
Свиноферми	5656,7	160,3	6,6	4,1
Птахофабрики	4721,5	377,7	0,0	0,0
Разом	-	923,8	11,0	1,2

Енергетичний потенціал продукції рослинництва оцінений згідно досліджень [15, 16, 17, 18, 19] досить значний, проте його використання знаходиться на рівні 2,1 % для соломи та 0,2 % для кукурудзи (таблиця 1.2).

Тому необхідне підвищення рівня використання доступної в якості енергоресурсів сировини сільськогосподарського походження, що в свою чергу призведе до зростання рівня енергетичної автономності агроєкосистем та дозволить вирішувати енергетичну задачу із збереженням або підвищенням ефективності виробництва продукції.

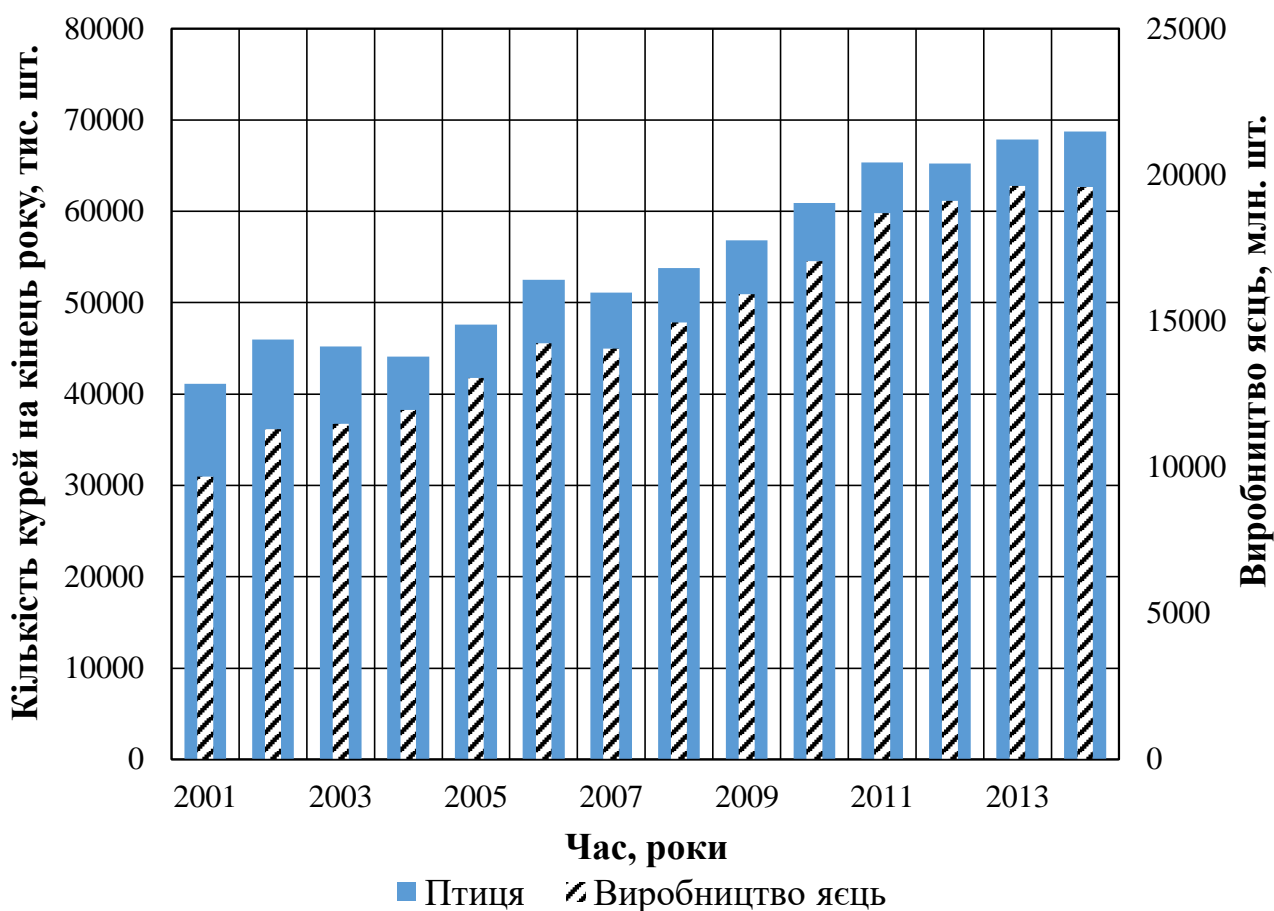


Рис. 1.3. Динаміка кількості курей виробництва продукції птахівництва

Вирішення задач функціонування агроєкосистеми, є науковою проблемою, яка викликана тим, що збільшення виробництва продуктів споживання (вирішення першої задачі) та збільшення виробництва енергії (вирішення другої задачі), призводить до погіршення екологічного стану агроєкосистеми, що в першу чергу виражається в дегуміфікації ґрунтового середовища (рис. 1.4) (не вирішення третьої задачі) [20]. Тобто, комплексне вирішення вказаних задач потребує подолання протиріччя, яке полягає в тому, що збільшення виробництва продуктів харчування або виробництва та споживання енергії призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення стану навколишнього середовища.

**Енергетичний потенціал в рослинництві
(в середньому за 2008-2014 рр.)**

Вид біомаси	Енергетичний потенціал, млн. т	Енергетичний потенціал, млн. т у.п.	Використано в якості енергоресурсу, тис. т	Використання енергетичного потенціалу, %
Солома зернових культур	9,2	4,5	194,1	2,1
Відходи виробництва кукурудзи на зерно:				
всього, у т.ч:	16,1	4,4	29,2	0,2
- стебла (з листям)	12,1	3,3	-	-
- стрижні	4,0	1,1	-	-
Відходи виробництва соняшника:				
всього, у т.ч:	8,3	1,7	0	0
- стебла (з листям)	5,7	1,2	-	-
- кошики	2,6	0,5	-	-
Всього	33,6	10,6	223,3	0,7

Зважаючи на те, що агроєкосистема має особливий характер взаємозв'язків між її елементами, який обумовлено конструкційною, а в більшості випадків і технологічною незалежністю окремих технічних виробів і різноманітністю задач, що вирішуються в процесі функціонування агроєкосистеми [21, 22], необхідне обґрунтування та формалізація взаємозв'язків між елементами агроєкосистеми, а також створення математичної моделі функціонування агроєкосистеми, яка б дозволила визначити граничні норми використання сільськогосподарської продукції на енергетичні потреби, та встановити основні параметри машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва, які використовуються в процесах отримання біопалива, а також машин, які безпосередньо задіяні в такому виробництві.

Причому, необхідно враховувати, що зменшення витрат енергії, збільшення продуктивності відповідних машин та обладнання, їх показників надійності й відповідності агротехнічним вимогам є основними напрямками удосконалення засобів механізації і обладнання в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва. У зв'язку з цим, визначення оптимальних параметрів робочих органів окремої машини чи обладнання доцільно проводити на основі комплексного кількісного показника, що враховує енергетичні

параметри, показники продуктивності, надійності та якості виконання операцій технологічного процесу [23, 24].

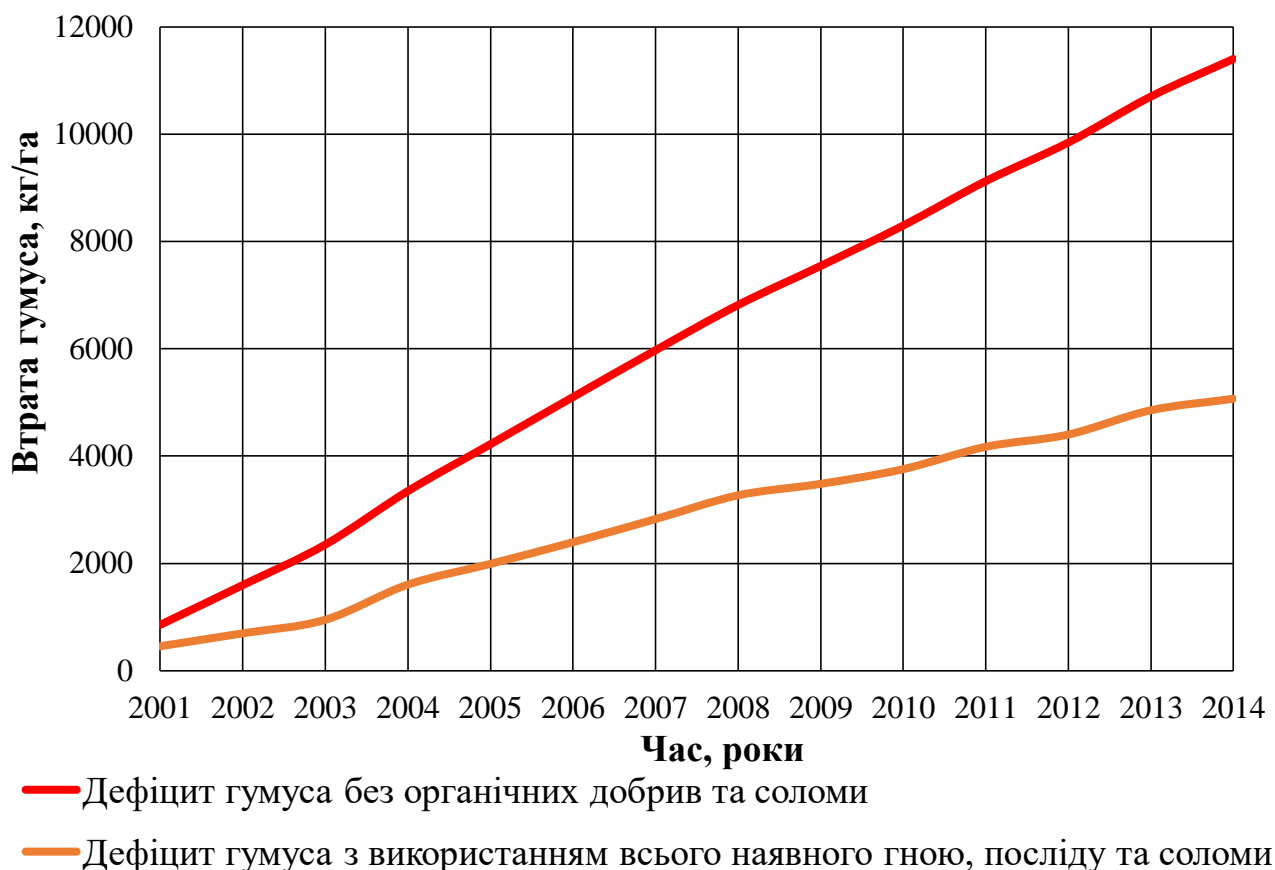


Рис. 1.4. Розрахункова динаміка втрати гумуса (наростаючим підсумком)

Процеси, машини та обладнання для отримання енергії із сільськогосподарської сировини повинні базуватись на безвідходних циклах виробництва, що засновані на комплексному використанні природно-сировинних ресурсів [25, 26, 27, 28, 29, 30].

З огляду на особливості сільськогосподарського виробництва та природно-кліматичні фактори [31, 32] основним джерелом енергоресурсів а агроєкосистемах може бути біомаса [33]. Для цього необхідне застосування сучасних технологій для конверсії біомаси сільськогосподарського походження в сучасні та зручні для споживання види енергоносіїв (такі як електроенергія, рідке та газоподібне паливо), а також ефективне використання твердого палива. [29, 34, 35, 36, 37]

До можливих напрямів підвищення енергетичної автономності агроєкосистем, зважаючи що сучасний рівень використання біомаси для виробництва теплової та електричної енергії (таблиця 1.3), складає 4,8 % від всього можливого виробництва енергії із біомаси, можна віднести: в рослинництві – вирощування біомаси та її подальша конверсія (рідке, тверде біопаливо); в тваринництві – удосконалення біогазових комплексів та отримання теплової та електричної енергії [38, 39, 40].

**Використання біомаси та біопалива
сільськогосподарського походження для виробництва енергії в Україні
(в середньому за 2008-2013 рр.)**

Вид біомаси (біопалива)	Річний обсяг споживання		Частка в річному обсязі виробництва енергії	Частка використання економічного потенціалу біомаси
	натуральні одиниці	тис. т у.п.		
Солома зернових культур	84 тис.т.	43	2,0%	1,0%
Біоетанол	52 тис.т	48	2,2%	6,7%
Біодизель	~0	~0	~0	~0
Біогаз	20 млн.м ³	12	0,6%	3,9%
Всього		103	4,8%	

Використання енергетичного потенціалу біомаси обмежено відсутністю агропромислових технологій отримання енергії та відповідної техніки і обладнання, які адаптовані до умов функціонування конкретних агроecosystem. Однак, існуючих закономірностей для визначення конструкційно-технологічних параметрів машин та обладнання, що дозволили б підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва шляхом удосконалення й отримання нових екологічно безпечних технологічних процесів, засобів механізації та обладнання для виробництва біопалива і отримання енергії недостатньо.

1.2. Аналіз технологій та технічних засобів для виробництва газоподібного, рідкого палива та отримання енергії при спалюванні твердого палива

У сільськогосподарському виробництві існує ряд факторів, які забезпечують доречність використання біогазових установок: перший – виробництво поновлюваної енергії, другий – виробництво екологічно чистих органічних добрив, третій – покращення санітарно-епідеміологічного стану довкілля, четвертий – широка різноманітність сировини, яка може застосовуватися для роботи біогазових установок. У виробничій сільськогосподарській практиці сформовано два основних напрямки розвитку технологій отримання біогазу та відповідного обладнання [3, 5, 41, 42, 43]:

– екстенсивний, коли біомасу зброджують у мезофільному режимі з використанням вертикальних реакторів робочим об'ємом 1000 м³ і більше;

– інтенсивний, коли біомасу зброджують у термофільному режимі з використанням модульних реакторів робочим об’ємом до 120 м³.

У першому варіанті (рис. 1.5) вартість анаеробного реактора відносно невелика при спрощеній схемі технологічного процесу. У той же час відсутня можливість забезпечити рівномірність протікання технологічного процесу за всім об’ємом субстрату та наявна велика кількість органічної і мінеральної складових субстрату, що є баластом. Крім того, вихід на робочі технологічні параметри при їх розгоні метантенків є складним та слабо контрольованим.

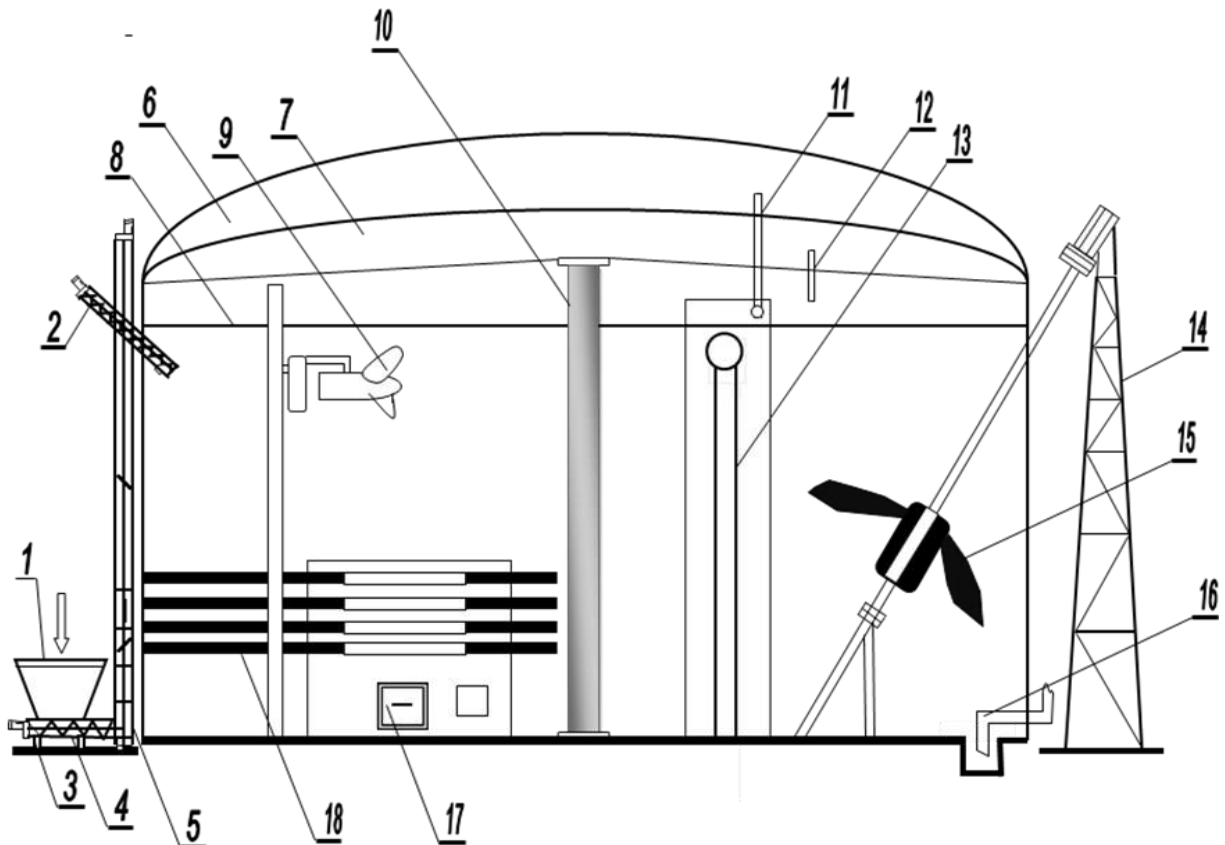


Рис. 1.5. Схема рідкофазної біогазової установки:

1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси.

У другому варіанті (рис. 1.6) технологічний процес обладнання що використовується більш складні. Проте, тривалість процесу виділення метану і виробництва добрив в 2-3 рази менша ніж при екстенсивному методі зброджування, практично відсутній баласт, забезпечується необхідна рівномірність процесу за всім об’ємом субстрату, спрощується застосування

інокуляції органічної маси. Крім того при аварійних ситуаціях кількість токсичної та інфекційно небезпечної біомаси на об'єкті піддається контролю, відсутні великі об'єми збродженої біомаси, що частково вирішує проблему їх зберігання після протікання процесу виділення біогазу.

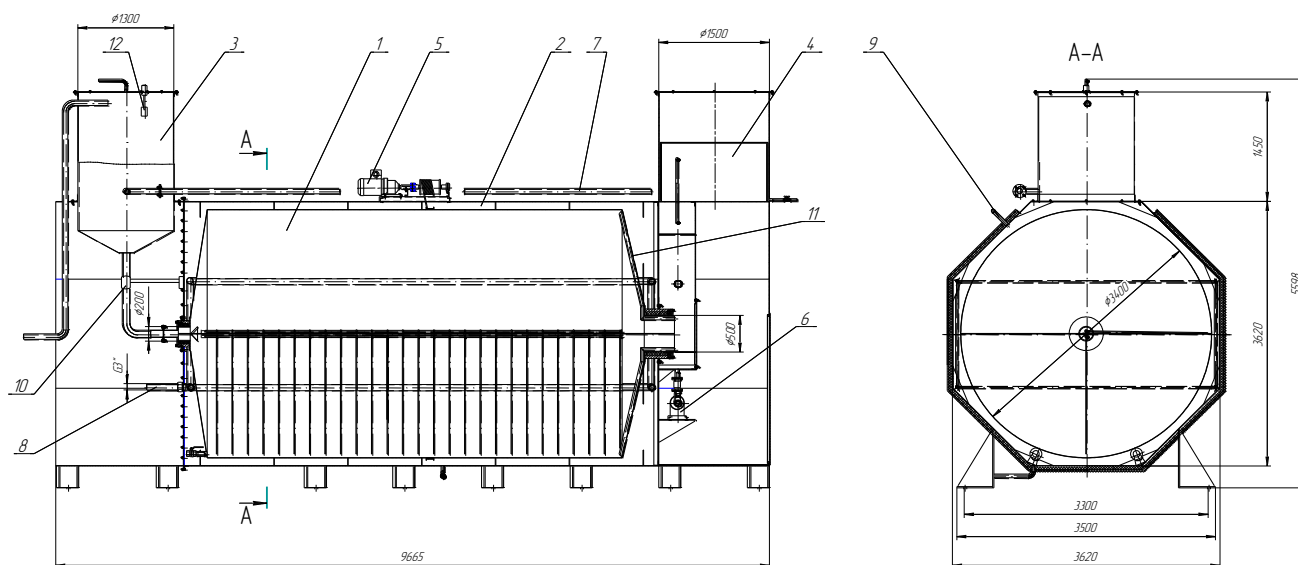


Рис. 1.6. Установа біогазова модульного типу:

1 – біореактор; 2 – ємність; 3 – теплообмінник; 4 – інокулятор; 5 – привод біореактора; 6 – насос для перекачування біомаси; 7 – трубопровід для перекачування біомаси; 8 – трубопровід для подачі гарячої води; 9 – трубопровід для доливання води в ємність; 10 – механізм загрузки біомаси; 11 – труба для відведення газу із біореактора; 12 – датчик рівня рідини; 13 – теплоізоляція.

Зважаючи на те що в Україні існують необхідні виробничі потужності металургійних і машинобудівних підприємств для створення необхідного обладнання інтенсивного виробництва біогазу, доречний розвиток технологій, коли біомасу зброджують у термофільному режимі з використанням модульних реакторів, що покращує контрольованість ведення технологічного процесу та економічні показники біогазових установок, у порівнянні із використанням реакторів великих об'ємів з екстенсивним методом зброджування [34, 35, 42, 43, 44, 45, 46, 47].

Основною проблемою технічного забезпечення виробництва біогазу в біореакторах інтенсивного типу є усунення розшарування маси субстрату, що значно знижує ефективність виділення метану, через нераціональне розташування метаноутворюючих організмів та речовин, якими вони живляться. Тому, необхідне перемішування, причому із встановленою раціональною інтенсивністю [3, 5, 48]. Отже, одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності виробництва біогазу в обортових реакторах, є мінімізація енерговитрат на перемішування субстрату.

Для отримання теплової енергії із біомаси в Україні виробляються теплогенератори з повітряним теплоносієм для спалювання соломи, які можна агрегатувати з сушарками та використовувати для опалення теплиць й

виробничих приміщень, водонагрівальні котли для обігріву виробничих приміщень та соціально-культурних об'єктів (рис. 1.7), котли-теплогенератори для спалювання відходів деревообробки [5, 9, 41].



Рис. 1.7. Котел RAU-2-600 для отримання теплової енергії від спалювання соломи виробництва АТ "Південтеплоенергомонтаж"

Проте, при отриманні теплової енергії із біомаси сільськогосподарського походження, загалом та соломи зернових, зокрема виникає ряд проблем. Зокрема, для підвищення ефективності використання сировини рослинницького походження в якості енергоносія [26, 49, 50, 51, 52, 53] необхідне узгодження конструкційних параметрів котлів із технологічними параметрами технологій збирання біомаси. Стосовно технологій прямого спалювання соломи на даний час відсутні засоби для спалювання подрібненої соломи в невеликих обсягах. Крім того, не вирішені проблеми рівномірності згоряння соломи в топці котла, що призводить до утворення надмірної кількості попелу та смол [5, 9, 41, 54, 55].

Для ефективного використання рідкого біопалива на основі сировини сільськогосподарського походження необхідне створення мережі заводів із виробництва дизельного біопалива які забезпечуються сировиною безпосередньо в умовах сільськогосподарського підприємства [56, 57, 58] за спрощеною агропромисловою технологією (таблиця 1.4) [56, 59, 60].

Існуюче обладнання (рис. 1.8) для виробництва дизельного біопалива не забезпечує ресурсощадність та енергоефективність технологічного процесу етерифікації в умовах сільськогосподарського виробника, при невеликих обсягах виробництва.



Рис. 1.8. Лінія промислового виробництва дизельного біопалива (НУБіП України)

Тому необхідна розробка та формалізація, як технологічних показників процесу отримання дизельного біопалива за агропромисловою технологією, так і обґрунтування раціональних конструкційних параметрів обладнання.

1.3. Особливості представлення агроєкосистеми у вигляд складної структури

Класичне визначення агроєкосистеми таке: під сільськогосподарською екологічною системою (агроєкосистемою) розуміють природний комплекс, змінений (трансформований) сільськогосподарською діяльністю людини [61]. Тобто, агроєкосистема – це система рослинних, тваринних та мікробіологічних угруповань з вираженим механізмом саморегулювання, проектна продуктивність якої підтримується за рахунок прямих і опосередкованих енергетичних інвестицій. При припиненні або критичному зниженні яких вона деградує та втрачає свої проектні властивості.

Отже, агроєкосистема це нестала система агроценопопуляцій культивованих рослин на оброблювальних ґрунтах. Вона має певний склад, структуру й режим, які підтримуються і регулюються сільськогосподарськими працівниками. При відсутності контролю з боку працівників поступово втрачає свої властивості.

Таке визначення агроєкосистеми не дозволяє встановити, який вплив на ефективність агроєкосистеми здійснюють параметри машин та обладнання, а також техніко-економічні показники технологій, що задіяні в межах агроєкосистеми.

Тому, необхідна формалізація агроєкосистем у вигляді природно-техногенних агроєкосистем (ПТАС). Кожна з яких є складною багатопараметричною ієрархічною структурою [62, 63], що складається з окремих об'єктів, які за визначеного рівня декомпозиції можуть вважатися за елементарні (такі що не підлягають подальшій їх декомпозиції) причому отримана структура визначена наявністю та щільністю енергії зв'язків поміж окремими її об'єктами. Крім того, така агроєкосистема в процесі взаємодії з зовнішнім середовищем здатна до самоорганізації і розвитку, реагує на зовнішні впливи та зберігає стабільність у визначених просторово-часових межах.

Проведена декомпозиція дозволяє вважати машини та обладнання, що застосовуються в межах окремої агроєкосистеми, об'єктами які входять у склад даної агроєкосистеми. Це дозволить оцінити та змоделювати вплив параметрів машин та обладнання на показники функціонування агроєкосистеми. При цьому машини та обладнання можна в свою чергу розглядати як такі що, самі є підсистемою, яка входить до складу агроєкосистеми.

Агроєкосистема в цілому та її підсистеми зокрема, повинні відповідати умовами існування:

- наявність матеріальних об'єктів системи – матеріальна умова;
- енергетична щільність зв'язків поміж об'єктами системи – енергетична умова.
- обмін впорядкованою інформацією поміж об'єктами системи – ідеологічна умова.

Розглядаючи впливи на елементи агроєкосистеми, необхідно уникати таких, що призводять до порушення визначених діапазонів варіювання матеріальних, енергетичних та інформаційних властивостей системи, знижують її стабільність і можуть вважатися зовнішніми «забруднювачами» [62, 63].

При представленні агроєкосистеми у вигляді складної структури необхідно, щоб її функціонування відповідало узагальнюючим системним теоремам [63, 64, 65, 66, 67, 68, 69]:

- агроєкосистема є тим більш стабільною, чим більше елементів та в'язей її складають (принцип Барталанфі-Комонера);
- у конкуренції з іншими агроєкосистемами виживає та з них, яка найкращим чином сприяє надходженню до неї зовнішньої енергії на найефективніше використовує максимальну кількість енергії, що надійшла (принцип Лотка-Одум-Моїсеєва);
- агроєкосистема не може бути описаною одним параметром, вона завжди є суттєво багатопараметричною (принцип Мітчерліха);
- сталість агроєкосистеми визначається найслабшою ланкою в ланцюгу її потреб (принцип Лібіха);
- агроєкосистема не може спонтанно підвищити ступінь своєї симетрії (принцип Кюр'є);
- з найбільшою ефективністю агроєкосистема функціонує у визначених просторово-часових межах (принцип Шелудченка);
- агроєкосистема завжди протидіє зовнішнім впливам, які прагнуть змінити її стабільний стан (принцип ле Шательє-Брауна);

- агроєкосистема з одного стабільного стану може перейти в інший стабільний стан лише через стан хаосу (принцип Чернавського);
- агроєкосистему не можливо пояснити перебуваючи в її межах (принцип Гьоделя).

Таким чином при формалізації нової агроєкосистеми необхідно чітко розуміти, на які цілі слід використати ресурси агроєкосистеми. Причому, необхідно враховувати, що ґрунти є одночасно умовою і результатом сільськогосподарської діяльності. А також вони пов'язують у просторі і часі природні й економічні межі агроєкосистем, тому необхідно оцінювати агроєкосистему за впливом її складових на баланс гумусу, як основний параметр стану ґрунтового середовища агроєкосистеми.

З такої точки зору опис агроєкосистеми – це модель, яка дозволяє передбачити зміну взаємозв'язків між елементами системи, зміну самих елементів у визначеному діапазоні умов. Дослідження агроєкосистеми необхідно виконувати із встановленням залежності «вплив – результат». Вплив здійснюється на вході в елементи агроєкосистеми, результат формується в процесі функціонування агроєкосистеми:

$$Y = R(X), \quad (1.1)$$

де X – вплив на вході в агроєкосистему (динаміка параметрів машин та обладнання, зміна показників технологічних процесів); Y – результат на виході (економічний ефект, позитивний баланс гумусу); R – оператор, що характеризує ефективність енергетичних перетворень в середині агроєкосистеми.

Якщо вважати, що функціональні властивості моделі агроєкосистеми характеризуються R -перетвореннями, то опис R -оператора буде його функціональним описом. Також R -перетворення можна задати за допомогою алгебраїчного, логічного, диференціального, інтегрального, скалярного, векторного або матричного операторів, що складені на підставі вимірювання зовнішніх характеристик, або дослідження зв'язку «вплив-реакція». Тобто опис R -оператора буде морфологічним описом агроєкосистеми. Якщо ж R -оператор розглядати, як термодинамічну ентропію (тобто сутність організації агроєкосистеми) чи як рівень знань про організацію цієї агроєкосистеми – як інформаційну ентропію, то це буде її інформаційним описом.

Функціональний опис агроєкосистеми може бути заданий, як [62, 69, 70]:

$$S_\varphi = \{T, x, C, Q, y, \varphi, \eta\}, \quad (1.2)$$

де T – множина моментів часу; x – множина миттєвих значень вхідних впливів (параметри машин та обладнання, що входять до складу агроєкосистеми, показники, що описують процеси їх роботи); $C = \{c: T \rightarrow x\}$ – множина допустимих вхідних впливів (конструкційні та технологічні обмеження); Q – множина станів агроєкосистеми; y – множина значень вихідних величин (економічний ефект, баланс гумусу, енергетична ефективність); $Y = \{u: T \rightarrow y\}$ – множина вихідних величин; $\varphi = \{T \cdot T \cdot T \cdot c \rightarrow Q\}$ – перехідна функція стану; $\eta = \{T \cdot Q \rightarrow y\}$ – вихідне відображення; c – приріст вхідного впливу; u – приріст вихідної величини.

Приведений опис охоплює широкий діапазон властивостей. Проте його складно інтерпретувати для практичного застосування. Крім того, функціональний опис повинен відображати процес та ієрархію агроєкосистеми.

Згідно до рівняння (1.2), можна зробити висновок, що функціональний опис необхідний для того, щоб визначити відношення системи, щодо інших систем. А функціональна модель, виконана на основі функціонального опису, повинна орієнтувати зовнішні в'язі системи, її контакти з довкіллям та напрями можливих змін системи. Тобто, функціональний опис дозволяє розглядати систему при заміні зовнішніх в'язей, контактів та напрямків розвитку системи відповідними реакціями у вигляді імітаційної моделі із адекватною поведінкою.

При створенні імітаційної моделі системи необхідно враховувати, що система може мати ряд функціональних станів [62, 63, 64, 70]:

- пасивне існування (система виступає, як матеріал інших систем);
- обслуговування систем більш високого порядку;
- протидія іншим системам чи зовнішньому середовищу (виживання системи);
- експансія інших систем або зовнішнього середовища;
- перетворення інших систем або зовнішнього середовища.

Тому, функція системи визначається числовим функціоналом, що залежить від функцій, які описують внутрішні процеси системи. Причому, щоб система функціонувала із необхідними параметрами, показники і процеси самої системи повинні бути обмежені визначеними межами. А ефективність системи, можна оцінити функціоналом ефективності системи, який можна отримати на основі рівняння (1.2).

Конкретизацію ж опису системи необхідно провести на такому рівні деталізації, щоб елементи що розглядаються були придатні для створення уяви про досліджуванні властивості структури агроєкосистеми, що дозволяє зробити морфологічний опис. Під елементом агроєкосистеми необхідно розуміти підсистему всередину якої опис не проникає. Причому елементний склад типової агроєкосистеми є гетерогенним. Морфологічні властивості системи суттєво залежать від характеру зв'язків між елементами розглядуваної системи. Перш за все, необхідно виокремити інформаційні, енергетичні та матеріальні зв'язки; визначивши відповідно інформаційні, енергетичні та матеріальні властивості. Необхідно також виокремлення прямих, зворотних та нейтральних зв'язків, залежно від виконуваних ними функцій щодо передачі речовини, енергії, інформації в системі, або від характеру керуючих функцій та ієрархії окремих елементів системи.

Морфологічний опис агроєкосистеми можна виразити наступним чином [62, 69, 70]:

$$S_M = \{\Sigma, V, \sigma, K\}, \quad (1.3)$$

де $\Sigma = \{\Sigma_i\}$ – множина елементів та їх властивостей (склад – гомогенний, гетерогенний, мішаний, невизначений; властивості елементів – інформаційні, енергетичні, матеріальні, нейтральні, невизначені); $V = \{V_j\}$ – множина зв'язків (інформаційні, енергетичні, матеріальні, зворотні, прямі, нейтральні); σ –

структура (детермінована, ймовірнісна); K – композиція (слабкість, сила, наявність підсистем, тип підсистем).

Морфологічний опис агроєкосистеми необхідно будувати за ієрархічним принципом шляхом послідовної декомпозиції системи та її підсистем.

Морфологічний опис системи дозволяє чітко встановити структуру системи, що відповідає функціональній моделі та виокремити інформаційні, матеріальні та енергетичні в'язі системи. На основі морфологічного опису системи можна визначити її структурні властивості, що визначають характер, стабільність взаємовідношень між елементами системи та просторове розташування або локалізацію елементів системи. Крім того, можливо встановити композиційні властивості системи, які характеризують об'єднання елементів в підсистеми та підсистем в систему.

З огляду на морфологію системи доречно говорити про такі підсистеми:

- ефекторні, ті що перетворюють зовнішній вплив та впливають на інші підсистеми і системи, зокрема та на довкілля, загалом;
- рецепторні, ті що перетворюють зовнішній вплив в інформаційний сигнали, що зберігаються або передаються;
- рефлексійні, ті що здатні до репродукування та генерації інформації.

Тобто функціональний опис дає відповідь на питання, які функції виконує система, а морфологічний – яким чином дана система виконує свої функції.

При виокремленні інформаційних в'язей, виникає можливість формального опису системи у вигляді рівнянь та залежностей. Тому важливим є також розгляд поняття, інформаційного опису.

Інформаційний опис агроєкосистеми повинен бути спрямований на ідентифікацію її апріорної мети та опис методології реалізації цієї мети, таким чином виражати ідеологію системи. Тобто, такий опис повинен відображати передбачуваність властивостей системи в часі.

Необхідно зазначити, що апріорна мета – максимальна економічна ефективність, є головною властивістю агроєкосистеми в цілому. Мета повинна визначатись не лише в межах інформаційного наповнення системи, але й бути зумовлена інформацією про оточуюче середовище. Таким чином, інформаційний опис системи має включати опис зовнішніх інформаційних потоків, що беруть участь у реалізації функцій та мети агроєкосистеми.

Необхідно також розглянути рівень впливу інформації на досягнення мети агроєкосистеми оцінивши його рангом інформації.

Загалом інформаційний опис агроєкосистеми має такий вигляд [62, 69, 70]:

$$S_I = \{G, m_G, I, W\}, \quad (1.4)$$

де G – апріорна мета агроєкосистеми; m_G – методологія реалізації апріорної мети за певного рівня її ідентифікації; $I = \{i: T \rightarrow I_{\pm i}\}$ – множина ранжованої інформації; T – множина моментів часу; $\pm i$ – ранг інформації; $W = \{w: I_{\pm i} \xrightarrow{H_w} m_G\}$ – множина внутрішніх та зовнішніх каналів інформації; H_w – ефективність обміну інформацією.

Інформаційний опис агроекосистеми визначає вплив морфологічних та функціональних властивостей системи на ступінь досягнення мети від якості інформації всередині агроекосистеми та такої, що надходить ззовні. Тому, інформаційний опис системи повинен включати опис зовнішніх інформаційних потоків, ранжованих відповідно до ступеня участі у реалізації функції системи.

Сукупність функціонального, морфологічного та інформаційного описів агроекосистеми відображає зміни та їх ефективність в часі. Очевидно, що ефективність агроекосистеми буде залежати від ефективності складових елементів агроекосистеми. Тому опис та подальше конструювання елементів агроекосистеми необхідно проводити із наслідуванням властивостей структури агроекосистеми. Використовуючи при цьому принцип поліморфізму [71, 72] та базуючись на твердженні про те, що ґрунтове середовище є одночасно умовою і результатом антропогенної сільськогосподарської діяльності, а також про те, що ґрунтове середовище та антропогенна діяльність, виражена через вплив сільськогосподарських машин та обладнання на множини станів агроекосистеми та вихідних величин (1.2), пов'язують за територією та часом природні й економічні межі агроекосистеми [73].

Наукові проблеми, що виникають при виробництві біопалива в агроекосистемах, можна встановити на основі функціонального, морфологічного та інформаційного описів. Необхідно зважати на те, що опис будь-якої наукової проблеми є системною моделлю цієї проблеми. Модель, формулює всі питання цієї проблеми в одному інформаційному, функціональному чи морфологічному полі. Розв'язок проблеми не може бути визначений повністю тому, що має постійно уточнюватись в процесі дослідження. А проблема має діалектичне протиріччя, яке необхідно вирішити. Тому, необхідно шукати додатковий зв'язок між об'єктами імітаційної моделі агроекосистеми, який би виключив із дослідження моделі її суперечливі властивості з одночасним коригуванням інших властивостей системи.

Функціональний, морфологічний та інформаційний описи системи також визначають принципи створення задач досліджень при вирішенні наукової проблеми. При визначенні напрямів дослідження агроекосистеми та її складових підсистеми, необхідно враховувати, що морфологічні властивості системи пов'язані з розподіленням речовини, функціональні – з обміном енергією між складовими системи та довкіллям, а інформаційні - із загальною організацією або ідеологією агроекосистеми. Проте, наявність трьох окремих описів системи не дозволяє достатньо повно виразити динаміку розподілу речовин та енергетичних процесів всередині агроекосистеми та пов'язати їх із організацією агроекосистеми. Тому, для створення імітаційної моделі функціонування агроекосистеми необхідна побудова єдиного морфо-функціонально-енергетичного опису який і вирішує наукову проблему дослідження агроекосистеми.

Відповідно, із створенням імітаційної моделі функціонування агроекосистеми стає можливим здійснення речовинно-енергетичної формалізації агроекосистеми, що дозволяє визначити рівень її енергетичної ефективності. Ефективність функціонування структурних елементів агроекосистеми залежить

від параметрів робочих машин, які використовуються в технологічних процесах відповідних структурних елементів.

Порівняльну оцінку ефективності механізованих технологічних процесів проводять, як правило, на основі економічних критеріїв. Основними серед них є витрати на виробництво продукції (визначається як сума відрахувань на технічне обслуговування та ремонт, заробітної плати, вартості пального або електроенергії, втраченої продукції та інших складових) і термін окупності машин та обладнання. Деякі параметри машин і обладнання встановлюються на основі мінімізації витрат на виконання технологічної операції [74, 75].

Зменшення витрат енергії на виконання заданої технологічної операції, збільшення продуктивності машин та обладнання, дотримання надійності й відповідності агротехнічним та зоотехнічним вимогам є основними напрямками удосконалення засобів механізації і обладнання в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва. У зв'язку з цим, порівняння робочих органів однотипних машин і обладнання в технологічному процесі виробництва або визначення оптимальних параметрів робочих органів окремої машини чи обладнання доцільно проводити на основі комплексного кількісного показника, що враховує кількість енергії, яка необхідна для забезпечення функціонування техніко-технологічної системи або реалізації технологічного процесу. Даний комплексний показник визначається енергетичними показниками, параметрами продуктивності, надійності та якості виконання операцій технологічного процесу.

Відомо, що ефективність використання енергії в процесі роботи техніко-технологічної системи оцінюється величиною коефіцієнту корисної дії η , а величина непродуктивних втрат енергії визначається коефіцієнтом втрат енергії ψ [62, 69, 76, 77]. Проте мінімізація втрат енергії машин та обладнання без урахуванням якісних показників їх роботи не дозволяє визначити оптимальні значення конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів машин та обладнання і провести їх об'єктивну порівняльну оцінку на етапі виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт [73].

Тому, комплексний кількісний показник, як критерій оптимізації для визначення параметрів робочих органів машин та обладнання, має бути прямо пропорційним коефіцієнту витрати енергії і обернено пропорційним обсягу виконаних робіт, коефіцієнту готовності та ймовірності того, наскільки показники якості роботи машин та обладнання відповідають агротехнічним та зоотехнічним вимогам. У цьому разі комплексний кількісний показник, як критерій оптимізації, повинен набувати мінімального значення:

$$\psi_E = \frac{\psi}{A_K P_H \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i} \rightarrow \min, \quad (1.5)$$

де ψ_E – комплексний показник енерговитрат, як критерій оптимізації роботи машини і обладнання в технологічному процесі, Дж⁻¹; A_K – корисна робота для одиниці машини чи обладнання (техніко-технологічної системи), Дж;

p_H – ймовірність безвідмовної роботи машини чи обладнання (або коефіцієнт готовності), відн. од.; p_i – ймовірність того, що значення i -го показника для оцінки якості роботи машин або обладнання знаходиться в межах заданих агротехнічними або зоотехнічними вимогами, відн. од.; α_i – вагомість i -го показника для оцінки якості роботи машини чи обладнання, яка встановлюється на основі експертних оцінок, відн. од.

У випадку коли відома робота підведена до одиниці машини чи обладнання, формула (1.5) буде мати вигляд:

$$\psi_E = \frac{\psi}{A_p(1-\psi)p_H \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i} = \frac{\psi}{A_p \eta p_H \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i} \rightarrow \min, \quad (1.6)$$

де A_p – підведена робота до одиниці машини чи обладнання (техніко-технологічної системи), Дж.

Зважаючи на те, що агроєкосистема, загалом та будь-який її структурний елемент, зокрема складаються з окремих технологічних об'єктів, які утворюють послідовні, паралельні або змішані ланцюги потоків енергії то і комплексні показники будуть мати різну форму запису. Якщо комплексні показники втрат енергії кожного окремого об'єкту відомі то для всієї техніко-технологічної системи при послідовному з'єднанні елементів:

$$\psi_{E\Sigma} = \sum_{i=1}^n \psi_{Ei} - \sum_{i=1}^n C_{\psi_{Ei}}^2 + \sum_{i=1}^n C_{\psi_{Ei}}^3 - \sum_{i=1}^n C_{\psi_{Ei}}^4 + \dots \pm \sum_{i=1}^n C_{\psi_{Ei}}^{n-1} \mp \prod_{i=1}^n \psi_{Ei} \rightarrow \min, \quad (1.7)$$

де C_n^m - сполучення з n елементів по m .

При паралельному з'єднанні технологічних елементів:

$$\psi_{E\Sigma} = \sum_{i=1}^n k_i \psi_{Ei} \rightarrow \min, \quad (1.8)$$

де k_i - коефіцієнт розподілення рушійних сил (прикладеної до системи роботи) за окремими розгалуженнями структурного елемента агроєкосистеми.

Відповідно, можна зробити висновок, що при послідовному з'єднанні елементів агроєкосистеми, загальна ефективність агроєкосистеми обмежується ефективністю найслабшої ланки [78, 79, 80], а при паралельному проходженні процесів, в режимі забезпечення більшої надійності функціонування агроєкосистеми.

Тому, для встановлення раціональних показників функціонування структурних елементів агроєкосистеми та агроєкосистеми в цілому, необхідно подальші дослідження скеровувати на проведення конкретної оптимізації параметрів машин та обладнання на основі запропонованих критеріїв та на раціональне розміщення машин та обладнання в технологічному процесі.

Зважаючи на те, що на стадії розробки технічної пропозиції і в подальшому – технічного завдання та проектування перспективних технічних засобів сільськогосподарського виробництва виникає проблема вибору оптимального варіанту конструкції, аналітично обґрунтовані параметри роботи обладнання (кінематичні, геометричні, динамічні тощо) мають бути апробовані з точки зору

працездатності конструкції, доцільності обраних параметрів та раціональності пропонованого рішення [79, 81, 82, 83]. Перевірка аналітично обґрунтованих рішень ускладнена з огляду на багатоваріантність пропозицій і пов'язана із значними витратами на виготовлення робочих зразків пропонованого обладнання. Разом з тим відомо, що на стадії технічної пропозиції пропоновані рішення можуть бути апробовані у вигляді аналітичної моделі з використанням комп'ютерної техніки. Така апробація зводить до мінімуму можливі помилки при розробці технічного завдання та проектування.

При розгляді енергетичних потоків та взаємозв'язків в агроекосистемах необхідно на рівні технічного завдання визначити нові ознаки (показники) конструйованої підсистеми. Ці ознаки стануть узагальненими координатами нової природно-техногенної агроекосистеми. Для отримання таких ознак необхідно визначити вектори (тренди) їх досягнення з дотриманням принципів каскадних біфуркацій, виконавши аналіз руйнування структур. Також необхідно виконати оцінку потоків енергії в середині самої природно-техногенної агроекосистеми із дотриманням законів термодинаміки систем.

Очевидно, що техніко-технологічні заходи, що виконуються в сільському господарстві також повинні бути узгоджені із потребами суміжних галузей аграрного виробництва, підтримувати баланс гумусу ґрунтового середовища та сприяти відтворенню родючості ґрунтів.

Загальна функціональна модель агроекосистеми повинна включати основні галузі сільськогосподарського виробництва: тваринництво та рослинництво, допоміжні – переробка сільськогосподарської продукції. Крім того, в складі агроекосистеми необхідно розглядати виробництво біопалива, як окрему підсистему [87, 88, 89, 90, 91].

Основною метою формалізації агроекосистеми є створення стійкої природно-техногенної конструкції [84], що є часткою біосфери Землі і її розвиток не повинен деградувати під впливом техногенних навантажень. Тому необхідно встановити чітку морфологічну структуру природно-техногенної агроекосистеми із чіткою оцінкою впливу техногенних об'єктів, що дозволить стежити за змінами в агроекосистемі, прогнозувати її розвиток та керувати її станом [92, 93].

Типова агроекосистема передбачає: вирощування культур у відповідній сівозміні [94, 95]; виробництво основної продукції рослинництва та тваринництва; виробництво кормів для тваринництва та птахівництва; виробництво тепла та енергії із біогазу отриманого в результаті зброджування продуктів життєдіяльності тварин та птиці; підготовку та використання деякої частки незернової частини урожаю на теплові потреби у вигляді генераторного газу, пелет, брикетів, тюків, рулонів або січки [96]; виробництво компосту, з використанням біологічної конверсії органічної сировини; виробництво рідкого біопалива – дизельного палива та етанолу [97, 98].

Для морфологічного опису нової природно-техногенної агроекосистеми необхідно виділити її елементарні блоки (ЕБА). Згідно із структурною схемою (рис. 1.9) необхідно виділи такі елементарні блоки агроекосистеми: рослинництво, тваринництво та птахівництво, переробка та зберігання

сільськогосподарської продукції, виробництво біопалива. Які також, матимуть у своєму складі елементарні блоки – машини та обладнання, що забезпечують технологічні процеси в елементарних блоках агроєкосистеми. Крім того кожен ЕБА, наприклад виробництво біопалива можна представити в свою чергу, як окрему природно-техногенну систему, також розділивши її на елементарні блоки: виробництво твердого палива (пелети, брикети, пряме спалювання біомаси), виробництво рідкого палива (дизельне біопаливо, біоетанол), виробництво газоподібного палива (біометан, генераторний газ), з яких також можна виділити окремі підсистеми – технологічні процеси виробництва та використання біопалива, та при подальшій декомпозиції перейти до параметрів машин та обладнання що забезпечують дані процеси.

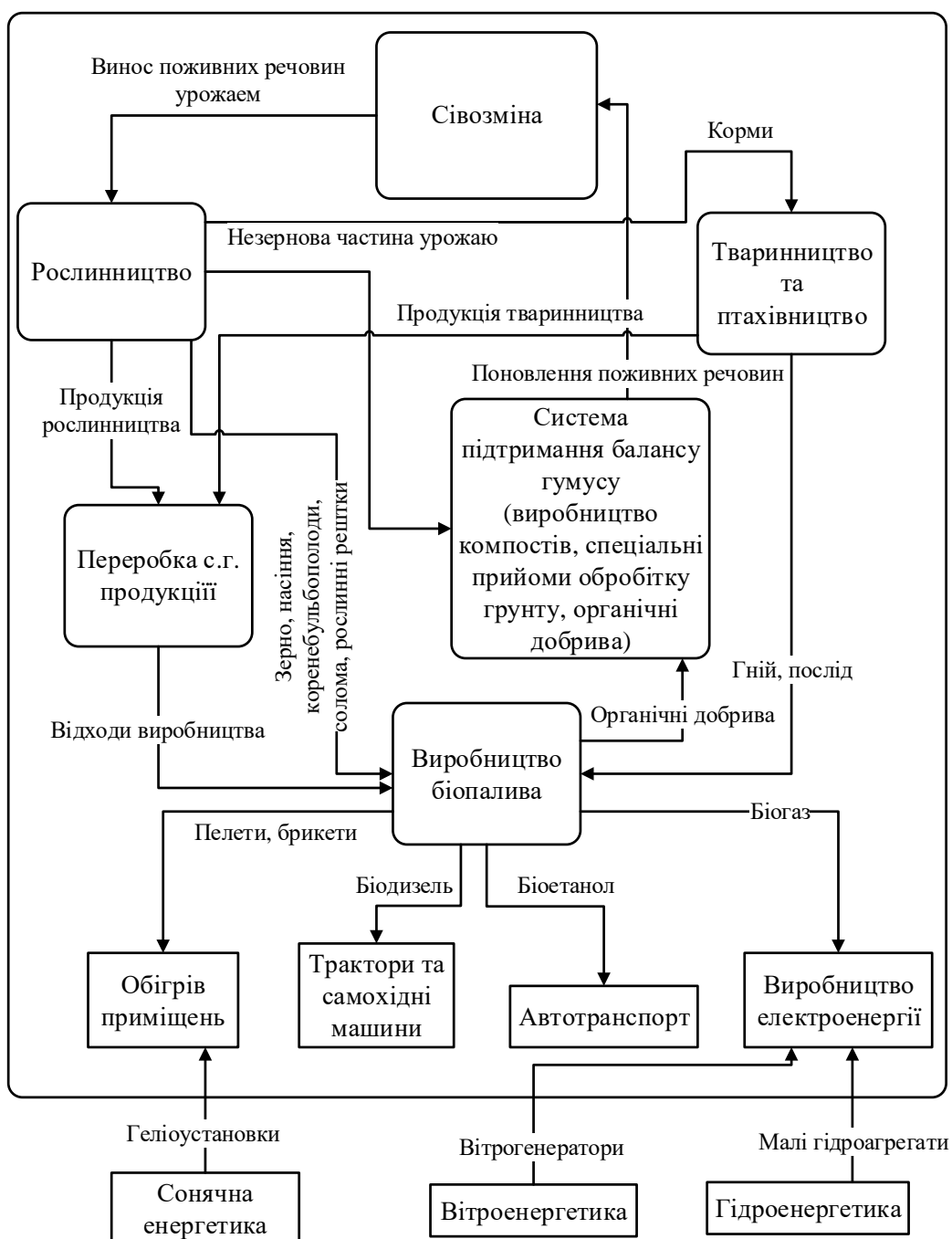


Рис. 1.9. Структурна схема агроєкосистеми із виробництвом біопалива

Заходи спрямовані на відновлення органічних речовин в ґрунті, тобто підтримання позитивного балансу гумусу необхідно також виокремити в ЕБА – підтримання балансу гумусу. В блоці підтримання балансу гумусу необхідно виділити підсистеми: внесення мінеральних та органічних речовин (в тому числі отриманих в результаті виробництва та використання біопалива), обробіток ґрунту [99], збереження агрономічно цінної структури ґрунту [79, 83], використання компостів, використання сидератів; з подальшою декомпозицією до параметрів машин та обладнання, що використовується в технологічних процесах даного ЕБА.

Баланс гумусу в сівозміні визначається як різниця між кількістю мінералізованого гумусу та його надходженням за рахунок гуміфікації кореневих решток, пожнивних залишок, біомаси бур'янів та сидератів, а також внесеного підстилкового гною та інших органічних речовин. Вихідними параметрами (даними) для розрахунку балансу гумусу сівозміні є комплекс статистичних, агрономічних та агрозоотехнічних показників. Серед них мінералізація гумусу культурами сівозміни, вихід сухої маси кореневих решток та сухої біомаси польових культур є такими параметрами, що залежать від урожайності польових культур і які згідно літературних джерел змінюються у широких межах [100]. Це дає можливість розробити лише наближений алгоритм розрахунку балансу гумусу в межах функціонального опису системи.

Виділення підтримання балансу гумусу, в окремий елементарний блок агроєкосистеми дозволяє змодельовати динаміку балансу гумусу під впливом зовнішніх факторів.

Тому, ще одним фактором, який ставить обмеження на функціонування елементарних блоків агроєкосистеми буде умова дотримання позитивного балансу гумусу:

$$\begin{aligned}
 BG = & \sum_{i=1}^n s_i u_i (k_{kp}^{iz} k_{kp}^{ie} + k_{mn}^{iz} k_{mn}^{ie}) + k_{ze} k_{oy} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_e^j + m_g^j + m_n^j) + \\
 & + k_{\kappa z} \left(\sum_{i=1}^n s_i u_i k_{\kappa}^i + k_{\kappa z} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_e^j + m_g^j + m_n^j) \right) + s_c u_c k_{zc} - \sum_{i=1}^n k_m^i s_i u_i \geq 0,
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

де BG – баланс гумусу сівозміни, кг; n – кількість культур в сівозміні; s_i – площа виділена під вирощування i -ї культури, га; u_i – урожайність i -ї культури, ц/га; k_{kp}^{iz} ; k_{mn}^{iz} – коефіцієнти гуміфікації кореневих решток та побічної продукції i -ї культури; k_{kp}^{ie} ; k_{mn}^{ie} – коефіцієнти, які враховують обсяг кореневої системи та побічної продукції, що залишається на полі після збирання i -ї культури; k_{ze} – коефіцієнт гуміфікації збродженого гною; k_{oy} – коефіцієнт використання гною в біогазових установках; m – кількість груп тварин, що отримують корми із сівозміни; N_j – поголів'я тварин та птиці j -го виду; T_j – стійловий період поголів'я тварин та птиці j -го виду, дїб; m_e^j – маса екскрементів j -го виду тварин та птиці, кг/голову за добу; m_g^j – маса вологи, що надходить в екскременти j -го

виду тварин та птиці, кг/голову за добу; m_n^j – маса підстилки для j -го виду тварин та птиці, кг/голову за добу; $k_{кз}$ – коефіцієнт гуміфікації компостів; k_k^i – коефіцієнт надходження побічної продукції на компостування; $k_{зк}$ – коефіцієнт надходження гною на компостування; s_c – площа виділена під сидерати, га; u_c – урожайність сидератів, ц/га; k_{zc} – коефіцієнт гуміфікації сидератів; k_m^i – коефіцієнт мінералізації гумусу i -ю культурою.

Виходячи із дотримання балансу гумусу можна встановити потенціали для елементарних блоків природно-техногенної агроєкосистеми із виробництва біопалива.

Так, для твердого біопалива потенціал сировини рослинного походження становитиме:

$$CE = \sum_{I=1}^{\Pi} s_I u_I \left[k_{III}^I - (k_{III}^{IB} + k_K^I) \right] - \sum_{J=1}^M N_J T_J m_{II}^J, \quad (1.10)$$

де CE – вихід із сівозміни біомаси (соломи) придатної для енергетичних потреб, кг; k_m^i – коефіцієнт виходу побічної продукції i -ї культури.

Потенціал біогазу:

$$BE = k_{гз} k_{гв} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_e^j + m_g^j + m_n^j) \rightarrow \max, \quad (1.11)$$

де BE – вихід біогазу, м³; $k_{гз}$ – коефіцієнт виходу газу в біогазових установках, м³/кг.

Потенціал для генераторного газу:

$$GE = k_{вгг}^I \left(\sum_{I=1}^{\Pi} s_I u_I \left[k_{III}^I - (k_{III}^{IB} + k_K^I) \right] - \sum_{J=1}^M N_J T_J m_{II}^J \right) \quad (1.12)$$

де GE – вихід генераторного газу, м³; $k_{ггг}^i$ – коефіцієнт виходу генераторного газу i -ї культури.

Потреби агроєкосистеми в дизельному біопаливі та біоетанолі можна задати виходячи із питомих витрат відповідних видів палива на 1 га ріллі та порівняти їх із відповідним потенціалом виробництва:

$$DE = N_{\delta} \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{m=1}^n s_{mo} u_{mo} k_{гк\delta}^m k_{г\delta}^m, \quad (1.13)$$

де DE – потреба в дизельному біопаливі, кг; N_{δ} – норма витрат дизельного біопалива, кг/га; s_{mo} – площа виділена під m -у олійну культуру, га; u_{mo} – урожайність m -ту олійної культури, ц/га; $k_{гк\delta}^m$ – коефіцієнт використання олійної культури для виробництва біодизельного пального; $k_{г\delta}^m$ – коефіцієнт виходу біодизельного пального.

$$EE = N_e \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{k=1}^n s_{ke} u_{ke} k_{гке}^k k_{ге}^k, \quad (1.14)$$

де EE – потреба в біоетанолі, кг; N_e – норма витрат біоетанолу, кг/га; s_{ke} – площа виділена під k -у культуру придатну для виробництва біоетанолу, га; u_{ke} –

урожайність k -ту культури придатної для виробництва біоетанолу; ц/га; $k_{вкк}^k$ – коефіцієнт використання культури для виробництва біоетанолу; $k_{вк}^k$ – коефіцієнт виходу біоетанолу.

Враховуючи, що подальша декомпозиція елементарних блоків агроєкосистеми призводить до їх поділу на машини, що використовуються для функціонування таких блоків і ті що забезпечують перетікання потоків енергії та інформації між елементарними блоками агроєкосистеми необхідно враховувати параметри робочих органів машин і обладнання, які в рівняннях (1.9) – (1.14) впливають на значення коефіцієнтів.

Враховуючи, що підтримання балансу гумусу в ґрунтах є визначальним фактором при використанні сировини сільськогосподарського походження на енергетичні потреби можна встановити значення ординат елементарних блоків природно-техногенної системи виробництва біопалива. Це дає можливість максимально ефективного балансування харчових, сировинних та енергетичних потреб із можливостями агроєкосистем при одночасному акумулюванні сонячної енергії у вигляді гумусу та утриманні й розширенні біологічного різноманіття біоценозів. Що дозволить виробництво біопалива у агроєкосистемах поєднувати із отриманням високоякісної та екологічно безпечної продукції.

1.4. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем

Теоретичною основою підвищення ефективності використання енергії агроєкосистемою є закон максимізації енергії, згідно з яким у конкуренції з іншими системами виживає та з них, яка найкраще сприяє надходженню енергії і використовує її максимальну кількість найбільш ефективним способом. З цією метою система:

- створює накопичувачі високоякісної енергії;
- витрачає частину накопиченої енергії на забезпечення надходження нової енергії (за допомогою механізмів зворотного зв'язку);
- забезпечує кругообіг речовин;
- створює механізми регулювання, що підтримують стійкість системи і її здатність пристосування до умов, що змінюються;
- налагоджує з іншими системами обмін, необхідний для забезпечення потреб в енергії спеціальних видів [1, 101, 102].

Агроєкосистема повинна регулюватися людиною. Будь-яке підвищення продуктивності агроєкосистеми вимагає підвищення витрат енергії, в тому числі антропогенної. Вони ідуть на підтримання енергопотенціалу агроєкосистеми або на зміну умов його реалізації.

Величина потоку антропогенної енергії залежить від мети, яку ставить виробник сільськогосподарської продукції, в основному отримання максимального доходу шляхом зниження енергоємності продукції. Досягається

максимальний дохід або зниженням енерговитрат при фіксованому рівні продуктивності, або випереджаючим приростом продуктивності до приросту енерговитрат. Перше завдання вирішується шляхом раціональної організації праці і виробництва, заміною енергоємних операцій менш енергоємними, друге – збільшенням рівня продуктивності системи [103]. Продуктивність системи визначається біокліматичним потенціалом, родючістю ґрунту, соціально-економічними умовами.

Зручним і оперативним показником збільшення рівня продуктивності системи є вміст гумусу в ґрунті [104]. Якщо при функціонуванні агроecosистеми вміст гумусу підвищується то можна говорити про збільшення рівня продуктивності системи. Якщо вміст гумусу в процесі функціонування агроecosистеми не змінюється - система не змінює свій рівень продуктивності, а якщо вміст гумусу знижується - система працює із зниженням рівня продуктивності.

Враховуючи визначенні коефіцієнти гуміфікації гною та рослинних решток при різному загортанні їх у ґрунт, погоджуємося із думкою, що гуміфікація анаеробний процес [105, 106].

Виходячи із цих міркувань витратними статтями гумусу є:

- використання простих речовин гідролізу гумусу (амінокислот, амінів, амідів) рослинами, для свого росту і розвитку [107];
- мінералізація гумусу мікроорганізмами;
- втрати гумусу в результаті ерозії.

Необхідно відмітити, що значний вплив на втрати гумусу за двома останніми статтями має обробіток ґрунтового середовища, з точки зору збереження агрономічно цінної структури ґрунту [108].

Статтями надходження гумусу є [107, 109]:

- внесення гною і компостів, як джерела поживних речовин;
- залишення в полі поживних решток: частини соломи, стебел сільськогосподарських культур, гички та інших подібних органічних решток;
- внесення мінеральних азотних добрив, для підвищення коефіцієнтів гуміфікації рослинних решток (8...10 кг/т поживних решток);
- коренева система, що залишилась в ґрунті після збирання основного урожаю;
- посіви сидеральних культур (зелене добриво);
- кореневі виділення органічних речовин (ескудат);
- мікроорганізми або мікрофауна ґрунту (до 14 т/га);
- мезофауна ґрунту.

Згідно із дослідженнями [105, 106, 107, 109] моделювання гумусного стану можна провести на основі потоків та запасів вуглецю гумусу в ґрунті та органічного вуглецю негумусної природи (органічних решток та органічних добрив) (рис. 1.10).

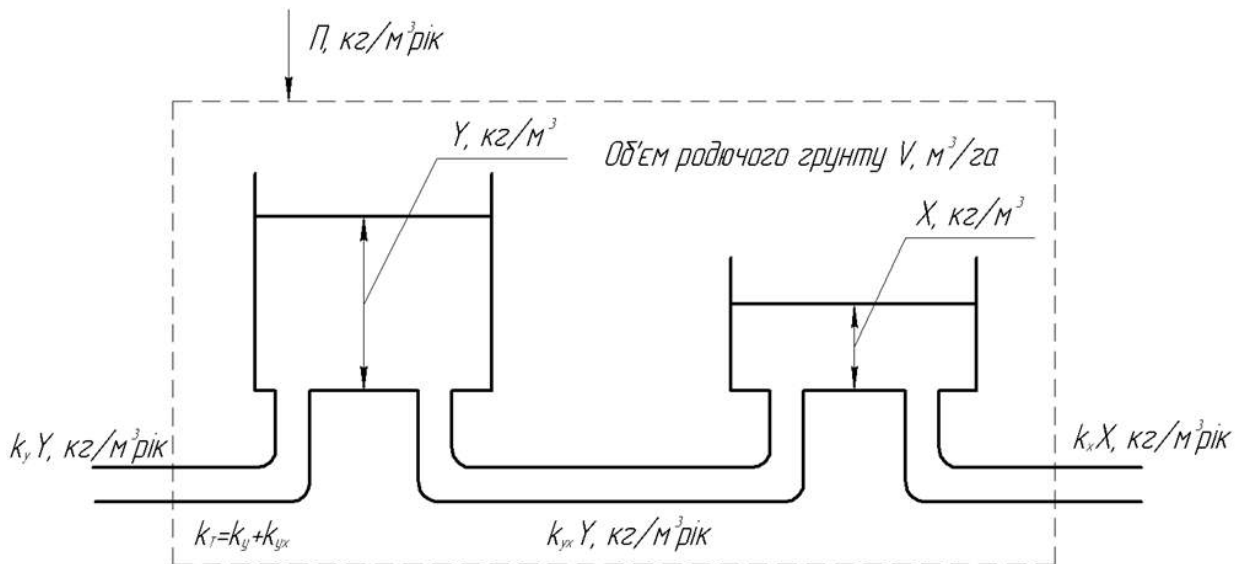


Рис. 1.10. Розрахунок зміни вмісту вуглецю в ґрунті:

P – надходження вуглецю негумусової природи в ґрунт, кг/м³ в рік; Y – вміст вуглецю негумусової природи в ґрунті, кг/м³; X – вміст вуглецю гумусу в ґрунті, кг/м³; V – об’єм родючого шару ґрунту, м³/га; k_y – коефіцієнт мінералізації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік; k_{yx} – коефіцієнт гуміфікації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік; k_x – коефіцієнт мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті, відн. од./рік; k_T – коефіцієнт трансформації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік.

При цьому можна сформувати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dY}{dt} = P - k_y Y - k_{yx} Y = P - Y(k_y + k_{yx}) = P - k_T Y \\ \frac{dX}{dt} = k_{yx} Y - k_x X, \end{cases} \quad (1.16)$$

де Y – вміст вуглецю негумусової природи в ґрунті, кг/м³; X – вміст вуглецю гумусу в ґрунті, кг/м³; V – об’єм родючого шару ґрунту, м³/га; P – надходження вуглецю негумусової природи в ґрунт, кг/м³ в рік; $k_y YV$ – мінералізація вуглецю негумусової природи в ґрунті, кг/га рік; $k_{yx} YV$ – гуміфікація вуглецю негумусової природи в ґрунті, кг/га рік; $k_x XV$ – мінералізація вуглецю гумусу в ґрунті, кг/га рік; k_y – коефіцієнт мінералізації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік; k_{yx} – коефіцієнт гуміфікації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік; k_x – коефіцієнт мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті, відн. од./рік; $k_T = k_y + k_{yx}$ – коефіцієнт трансформації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік.

Із другого рівняння системи (1.16) можна знайти:

$$Y = \frac{1}{k_{yx}} \frac{dX}{dt} + \frac{k_x}{k_{yx}} X; \quad \frac{dY}{dt} = \frac{1}{k_{yx}} \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{k_x}{k_{yx}} \frac{dX}{dt}. \quad (1.17)$$

Підставивши вирази (1.18) в рівняння (1.16) одержимо:

$$\frac{1}{k_{yx}} \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{k_x}{k_{yx}} \frac{dX}{dt} = \Pi - \frac{k_T}{k_{xy}} \frac{dX}{dt} - \frac{k_T k_x}{k_{yx}} X, \quad (1.18)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + (k_x + k_T) \frac{dX}{dt} + k_T k_x X = \Pi k_{yx}. \quad (1.19)$$

Однорідне рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + (k_x + k_T) \frac{dX}{dt} + k_T k_x X = 0. \quad (1.20)$$

Характеристичне рівняння і його розв'язок матимуть вигляд:

$$\lambda^2 + (k_x + k_T) \lambda + k_T k_x = 0, \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{k_x^2 + 2k_x k_T + k_T^2}{4} - k_x k_T} = \\ &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{k_x^2 + 2k_x k_T + k_T^2 - 4k_x k_T}{4}} = \end{aligned} \quad (1.22)$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{(k_x - k_T)^2}{4}} = -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \frac{(k_x - k_T)}{2}, \\ &\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{(k_x + k_T)}{2} + \frac{(k_x - k_T)}{2} = -k_T \\ \lambda_2 = -\frac{(k_x + k_T)}{2} - \frac{(k_x - k_T)}{2} = -k_x. \end{cases} \end{aligned} \quad (1.23)$$

Розв'язок однорідного рівняння (1.20) матиме вигляд:

$$X_{од} = C_1 \exp(-k_T t) + C_2 \exp(-k_x t). \quad (1.24)$$

Один із розв'язків (частковий розв'язок) матиме вигляд:

$$X_{чр} = \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (1.25)$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння (1.19) матиме вигляд:

$$X = C_1 \exp(-k_T t) + C_2 \exp(-k_x t) + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (1.26)$$

При початкових умовах:

$$t = 0 \Rightarrow X = X_0; \quad t = 0 \Rightarrow \frac{dX}{dt} = \left(\frac{dX}{dt} \right)_0, \quad (1.27)$$

де X_0 – вміст вуглецю в ґрунті в момент часу $t = 0$, кг/м³;

$\left(\frac{dX}{dt} \right)_0$ – швидкість зміни вмісту гумусу в ґрунті у момент часу $t = 0$, кг/м³

рік;

визначимо постійні диференціювання:

$$\frac{dX}{dt} = -k_T C_1 \exp(-k_T t) - k_x C_2 \exp(-k_x t),$$

$$\begin{cases} X_0 = C_1 + C_2 + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \\ \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 = -k_T C_1 - k_x C_2, \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \\ -k_T C_1 - k_x C_2 = \left(\frac{dX}{dt} \right)_0, \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -k_T & -k_x \end{vmatrix} = k_T - k_x,$$

$$\Delta C_1 = \begin{vmatrix} X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi & 1 \\ \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 & -k_x \end{vmatrix} = -X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_T} \Pi - \left(\frac{dX}{dt} \right)_0,$$

$$\Delta C_2 = \begin{vmatrix} 1 & X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \\ -k_T & \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 \end{vmatrix} = \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_T - \frac{k_{yx}}{k_x} \Pi,$$

$$C_1 = \frac{\Delta C_1}{\Delta} = \frac{-X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_T} \Pi - \left(\frac{dX}{dt} \right)_0}{k_T - k_x},$$

$$C_2 = \frac{\Delta C_2}{\Delta} = \frac{\left(\frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_T - \frac{k_{yx}}{k_x} \Pi}{k_T - k_x}.$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння (1.20) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} X = & \frac{1}{k_T - k_x} \left(-X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi - \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 \right) \exp(-k_T t) + \\ & + \frac{1}{k_T - k_x} \left(\left(\frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_T - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \right) \exp(-k_x t) + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \end{aligned} \quad (1.28)$$

При $t=0$ вміст вуглецю гумусу становить $X_t = X_0$, а при $t=\infty$ вміст гумусу становить:

$$X_t = \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (1.29)$$

Щоб не допустити дегуміфікації цілинного ґрунту і утримати початковий вміст гумусу, необхідно щорічно вносити в ґрунт вуглець негумусової природи в кількості:

$$\Pi = \frac{k_x k_T}{k_{yx}} X_0. \quad (1.30)$$

Для перевірки представленної моделі динаміки зміни вмісту вуглецю гумусу, було використано дані Г.Я. Чесняка та М.К. Шикучи [105, 107, 110, 111] за Михайлівським стаціонарним дослідом для сівозміни із багаторічними травами (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4

Результати перевірки математичної моделі, що описує зміну вмісту вуглецю гумусу за даними польового стаціонарного дослідження на чорноземі типовому Михайлівській цілині (прошарок ґрунту до 1 м, сівозміна з багаторічними травами)

Час від початку розорювання цілини, років	Запаси гумусу в ґрунті (дані Г. Я. Чесняка)		Запаси вуглецю гумусу (58% від вмісту гумусу)			
			Розраховано за даними Г. Я. Чесняка		Розраховано за пропонованою моделлю	
	т/га	кг/м ³	т/га	кг/м ³	т/га	кг/м ³
0	548	54,8	318	31,8	317	31,7
37	521	52,1	302	30,2	295	29,5
52	490	49,0	284	28,4	287	28,7
100	466	46,6	270	27,0	264	26,4
Розрахункові показники						
Надходження вуглецю не гумусової природи P			3,12	0,31	Абсолютне відхилення	
Коефіцієнт щорічної гуміфікації вуглецю негумусової природи k_{yx}			відн.од	0,2	т/га	кг/м ³
Коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті k_x			відн.од	0,004	1	0,08
Коефіцієнт щорічної трансформації вуглецю не гумусової природи k_T			відн.од	1,0	7	0,72
Початковий вміст вуглецю в гумусі X_0			317,07	31,7	-3	-0,27
Початкова швидкість зміни вмісту вуглецю в гумусі $\left(\frac{dX}{dt}\right)_0$			-0,54	-0,05	6	0,62
Постійна диференційного рівняння C_1				-0,01	Відносне відхилення, %	
Постійна диференційна рівняння C_2				16,05	0,24	-0,95
Вміст вуглецю у гумусі при усталеному режимі X_t				15,60	2,38	2,31

При вказаних значеннях коефіцієнтів та товщині родючого шару ґрунту 1 м, необхідно вносити 6,34 т вуглецю на один гектар в рік для сівозміни із багаторічними травами та 8,89 т вуглецю для сівозміни без багаторічних трав.

Аналогічні розрахунки для сівозміни без багаторічних трав приведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Результати перевірки математичної моделі, що описує зміну вмісту вуглецю гумусу за даними польового стаціонарного дослідження на чорноземі типовому Михайлівській цілини (прошарок ґрунту до 1м, сівозміна без багаторічних трав)

Час від початку розорювання цілини, років	Запаси гумусу в ґрунті (дані Г. Я. Чесняка)		Запаси вуглецю гумусу (58% від вмісту гумусу)			
			Розраховано за даними Г. Я. Чесняка		Розраховано за пропонованою моделлю	
	т/га	кг/м ³	т/га	кг/м ³	т/га	кг/м ³
0	548	54,8	318	31,8	320	32,0
37	518	51,8	300	30,0	282	28,2
52	465	46,5	270	27,0	268	26,8
100	423	42,3	245	24,5	230	23
Розрахункові показники						
Надходження вуглецю не гумусової природи I			2,52	0,25	Абсолютне відхилення	
Коефіцієнт щорічної гуміфікації вуглецю негумусової природи k_{yx}			відн.од	0,18	т/га	кг/м ³
Коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті k_x			відн.од	0,005	-2	-0,24
Коефіцієнт щорічної трансформації вуглецю не гумусової природи k_T			відн.од	1,0	19	1,87
Початковий вміст вуглецю в гумусі X_0			320,23	32	2	0,18
Початкова швидкість зміни вмісту вуглецю в гумусі $\left(\frac{dX}{dt}\right)_0$			-0,86	-0,09	15	1,52
Постійна диференційного рівняння C_1				-0,03	Відносне відхилення, %	
Постійна диференційна рівняння C_2				22,86	-0,75	0,67
Вміст вуглецю у гумусі при усталеному режимі X_t				9,07	6,24	6,21

Згідно даних таблиць 1.4 та 1.5. побудовано порівняльні графіки (рис. 1.11), на основі яких можна стверджувати, що представлена модель динаміки вмісту вуглецю гумусу в родючому прошарку ґрунту є адекватною та дозволяє виконувати відповідні розрахунки. Відхилення розрахункових значень вмісту вуглецю гумусу від фактичних оцінювалося індексом детермінації, який становив для сівозміни із багаторічними травами 0,952, а для сівозміни без багаторічних трав – 0,931.

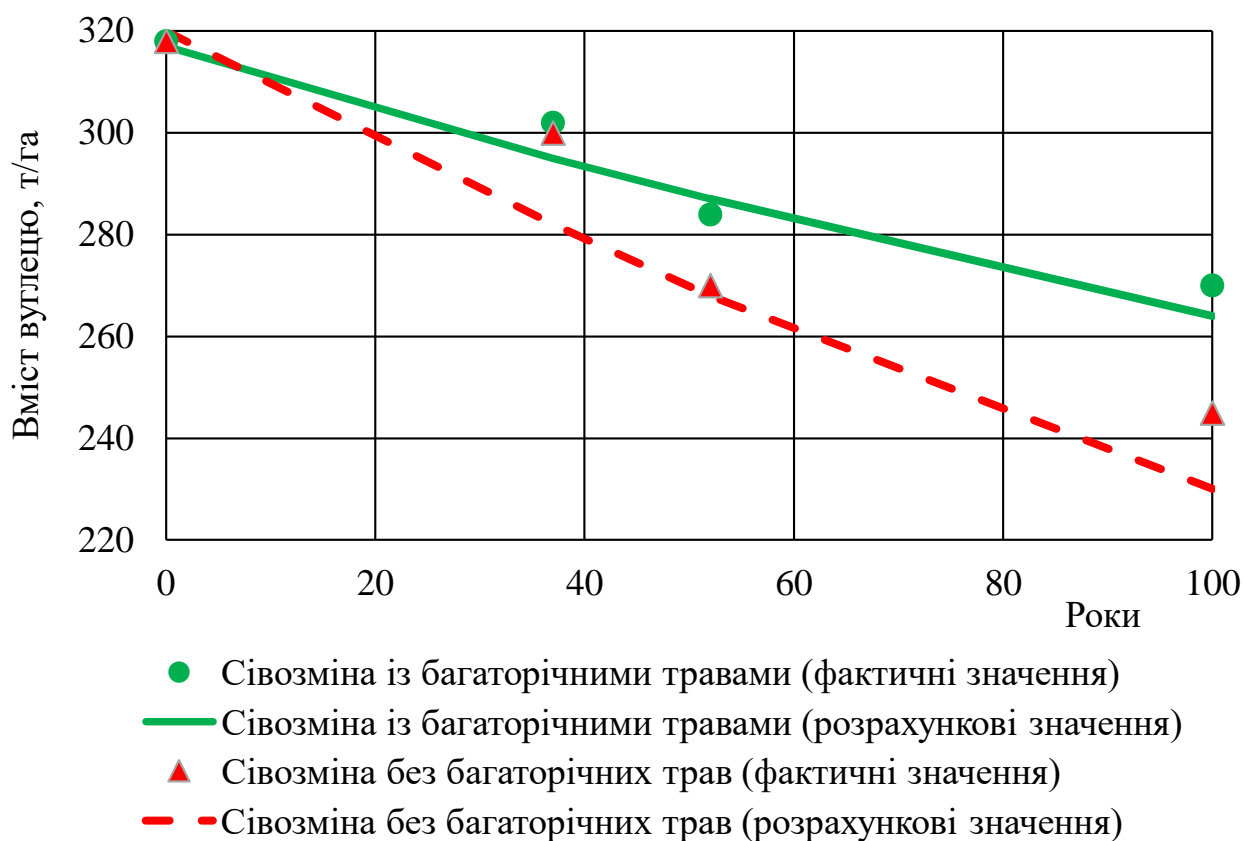


Рис. 1.11. Порівняння фактичних і розрахункових значень зміни вуглецю гумусу

Врахувавши надходження органічної речовини в ґрунт диференційне рівняння, що описує зміну гумусу можна записати наступним чином:

$$\frac{dX}{dt} = k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X, \quad (1.31)$$

де X – вміст гумусу в ґрунті, т/га; Π – щорічне надходження органічної речовини в ґрунт, т/га рік; $k_{\text{гум}}$ – коефіцієнт гуміфікації органічної речовини, що надходить в ґрунт, відн. од.; $k_{\text{мін}}$ – коефіцієнт щорічної мінералізації гумусу в ґрунті, відн. од./рік.

Загальний розв'язок диференційного рівняння (1.27) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X} &= dt; \quad -\frac{1}{k_{\text{мін}}} \ln \frac{k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X}{k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X_0} = t, \\ \frac{k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X}{k_{\text{гум}} \Pi - k_{\text{мін}} X_0} &= \exp(-k_{\text{мін}} t), \\ k_{\text{мін}} \Pi - k_{\text{мін}} X &= (k_{\text{мін}} \Pi - k_{\text{мін}} X_0) \exp(-k_{\text{мін}} t), \\ X &= \frac{k_{\text{гум}} \Pi}{k_{\text{мін}}} + \left(-\frac{k_{\text{гум}} \Pi}{k_{\text{мін}}} + X_0 \right) \exp(-k_{\text{мін}} t), \\ X &= \frac{k_{\text{гум}} \Pi}{k_{\text{мін}}} [1 - \exp(-k_{\text{мін}} t)] + X_0 \exp(-k_{\text{мін}} t). \end{aligned} \quad (1.32)$$

При $t=0$ вміст гумусу становить $X_t = X_0$, а при $t = \infty$ вміст гумусу становить:

$$X_t = \frac{k_{\text{сум}}}{k_{\text{мін}}} P. \quad (1.33)$$

Перевірку моделі динаміки зміни гумусу виконаємо за даними Г. Я. Чесняка та М. К. Шикучи [105, 107, 110, 111, 112] для сівозміни із багаторічними травами (таблиця 1.6).

Таблиця 1.6

Результати перевірки математичної моделі, що описує зміну вмісту гумусу за даними польового стаціонарного дослідження на чорноземі типовому Михайлівської цілини (прошарок ґрунту до 1м, сівозміна з багаторічними травами)

Час від початку розорювання цілини, років	Запаси гумусу в ґрунті (дані Г. Я. Чесняка)	Розраховано за пропонованою моделлю			
	т/га	т/га			
Сівозміна з багаторічними травами, товщина родючого шару ґрунту		1	м		
0	548	548			
37	521	508			
52	490	494			
100	466	455			
Розрахункові параметри					
Щорічне надходження органічної речовини в ґрунт P		26,9		Відхилення	
Коефіцієнт гуміфікації органічної речовини $k_{\text{сум}}$		відн.од.	0,2	абсолютне	відносне
Коефіцієнт щорічної мінералізації гумусу в ґрунті $k_{\text{мін}}$, відн. од.		відн.од	0,0124	0	0,0
Вміст вуглецю в органічній речовині		відн.од	0,4	13	2,5
Початковий вміст гумусу в ґрунті X_0		548		-4	-0,8
Вміст гумусу в ґрунті в усталеному режимі X_t		433,9		11	2,3

Аналогічно для сівозміни без багаторічних трав дані приведені в таблиці 1.7.

Згідно даних таблиць 1.6 та 1.7 побудовано порівняльні графіки (рис. 1.12), на основі яких можна стверджувати, що представлена модель динаміки вмісту гумусу в родючому прошарку ґрунту є адекватною та дозволяє виконувати відповідні розрахунки (відхилення розрахункових значень вмісту вуглецю гумусу від фактичних оцінювалося індексом детермінації, який становив для сівозміни із багаторічними травами 0,95, а для сівозміни без багаторічних трав – 0,93).

Таблиця 1.7

Результати перевірки математичної моделі, що описує зміну вмісту гумусу за даними польового стаціонарного досліджу на чорноземі типовому Михайлівській цілини (прошарок ґрунту до 1м, сівозміна без багаторічних трав)

Час від початку розорювання цілини, років	Запаси гумусу в ґрунті (дані Г. Я. Чесняка)	Розраховано за пропонованою моделлю	
	т/га	т/га	
Сівозміна без багаторічних трав, товщина родючого шару ґрунту		1	м
0	548	548	
37	518	494	
52	465	474	
100	423	422	
Розрахункові параметри			
Щорічне надходження органічної речовини в ґрунт Π		21,6	
Коефіцієнт гуміфікації органічної речовини $k_{гум}$		відн.од.	0,2
Коефіцієнт щорічної мінералізації гумусу в ґрунті $k_{мін}$, відн. од.		відн.од.	0,0128
Вміст вуглецю в органічній речовині		відн.од.	0,4
Початковий вміст гумусу в ґрунті X_0		548	-9
Вміст гумусу в ґрунті в усталеному режимі X_t		376,6	1
			0,3

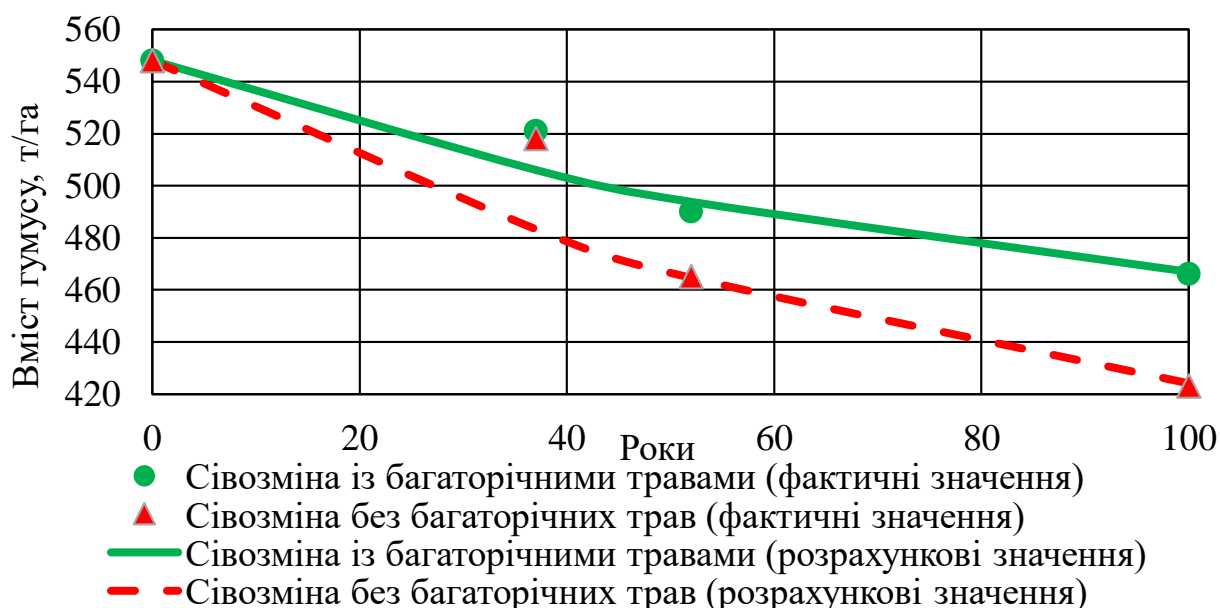


Рис. 1.12. Порівняння фактичних і розрахункових значень зміни вмісту гумусу

Виконавши аналіз зміни гумусового стану ґрунтів упродовж періоду часу, про який існують достовірні дані, можна зробити висновок, щодо постійного зменшення вмісту гумусу в родючому стані ґрунту, а моделювання гумусного стану можна провести на основі потоків та запасів вуглецю гумусу в ґрунті та органічного вуглецю негумусної природи (органічних решток та органічних добрив).

Крім того необхідно формалізувати показники, щодо точної кількості надходження органічної речовини в ґрунт, для компенсації втрати гумусу та можливості самостабілізації вмісту гумусу, без внесення органічної речовини.

На основі статистичних показників [104, 106, 110, 113, 114] можна запропонувати три моделі динаміки вмісту гумусу за тривалий період часу.

Перша модель побудована на допущенні, що зміна вмісту гумусу $\frac{dH}{dt}$ обернено пропорційна вмісту гумусу H і часу t .

$$\frac{dH}{dt} = -k_{Ht} H t, \quad (1.34)$$

де H – вміст гумусу в родючому шарі ґрунту, %; t – час, роки; k_{Ht} – коефіцієнт пропорційності за гумусом і часом.

Перепишемо рівняння (1.34) у вигляді:

$$\frac{dH}{H} = -k_{Ht} t dt,$$

та розв'яжемо його:

$$\ln H - \ln H_0 = -\frac{k_{Ht}}{2} (T^2 - T_0^2),$$

$$\ln \frac{H}{H_0} = -\frac{k_{Ht}}{2} (T^2 - T_0^2),$$

$$\frac{H}{H_0} = \exp \left[-\frac{k_{Ht}}{2} (T^2 - T_0^2) \right],$$

$$H = H_0 \exp \left[-\frac{k_{Ht}}{2} (T^2 - T_0^2) \right].$$

Визначимо коефіцієнт пропорційності:

$$k_{Ht} = \frac{2}{T^2 - T_0^2} \ln \frac{H_0}{H};$$

$$H_0 = 4,17\% \text{ при } T_0 = 1882; H = 3,01\% \text{ при } T = 2013;$$

де T – кінець періоду, рік;

T_0 – початок періоду, рік.

$$k_{Ht} = \frac{2}{2013^2 - 1882^2} \ln \frac{4,17}{3,01} = 1,2778 \cdot 10^{-6}.$$

Тоді:

$$H = 4,17 \exp \left[-\frac{1,2778 \cdot 10^{-6}}{2} (T^2 - 1882^2) \right]. \quad (1.35)$$

Друга модель побудована на допущенні, що зміна вмісту гумусу $\frac{dH}{dt}$ обернено пропорційна вмісту гумусу H .

$$\frac{dH}{dt} = -k_H H; \quad (1.36)$$

де k_H – коефіцієнт пропорційності за гумусом.

Перепишемо рівняння (1.36) у вигляді:

$$\frac{dH}{dt} = -k_H dt;$$

та розв'яжемо його: $\ln H - \ln H_0 = -k_H (T - T_0)$;

$$\ln \frac{H}{H_0} = -k_H (T - T_0);$$

$$\frac{H}{H_0} = \exp[-k_H (T - T_0)];$$

$$H = H_0 \exp[-k_H (T - T_0)].$$

Визначимо коефіцієнт пропорційності:

$$k_H = \frac{1}{T - T_0} \ln \frac{H_0}{H},$$

$$H_0 = 4,17\% \text{ при } T_0 = 1882, \quad H = 3,01\% \text{ при } T = 2013,$$

$$k_H = \frac{1}{2013 - 1882} \ln \frac{4,17}{3,01} = 2,4884 \cdot 10^{-3}.$$

Тоді:

$$H = 4,17 \exp[-2,4884 \cdot 10^{-3} (T - 1882)]. \quad (1.37)$$

Третя модель побудована на допущенні, що зміна вмісту гумусу $\frac{dH}{dt}$ обернено пропорційна часу t .

$$\frac{dH}{dt} = -k_t t, \quad (1.38)$$

де k_t – коефіцієнт пропорційності за часом.

Перепишемо рівняння (1.38) у вигляді:

$$dH = -k_t t dt,$$

і розв'яжемо його:

$$H - H_0 = -\frac{k_t}{2} (T^2 - T_0^2),$$

$$H = H_0 - \frac{k_t}{2}(T^2 - T_0^2).$$

Визначимо відповідний коефіцієнт пропорційності:

$$k_t = 2 \frac{H_0 - H}{T^2 - T_0^2};$$

$$H_0 = 4,17\% \text{ при } T_0 = 1882; H = 3,01\% \text{ при } T = 2013;$$

$$k_t = 2 \frac{4,17 - 3,01}{2013^2 - 1882^2} = 4,5468 \cdot 10^{-6}.$$

Тоді:

$$H = 4,17 - \frac{4,5468 \cdot 10^{-6}}{2}(T^2 - 1882^2). \quad (1.39)$$

Залежності (1.35, 1.37 та 1.39) можна представити в графічній формі (рис. 1.13).

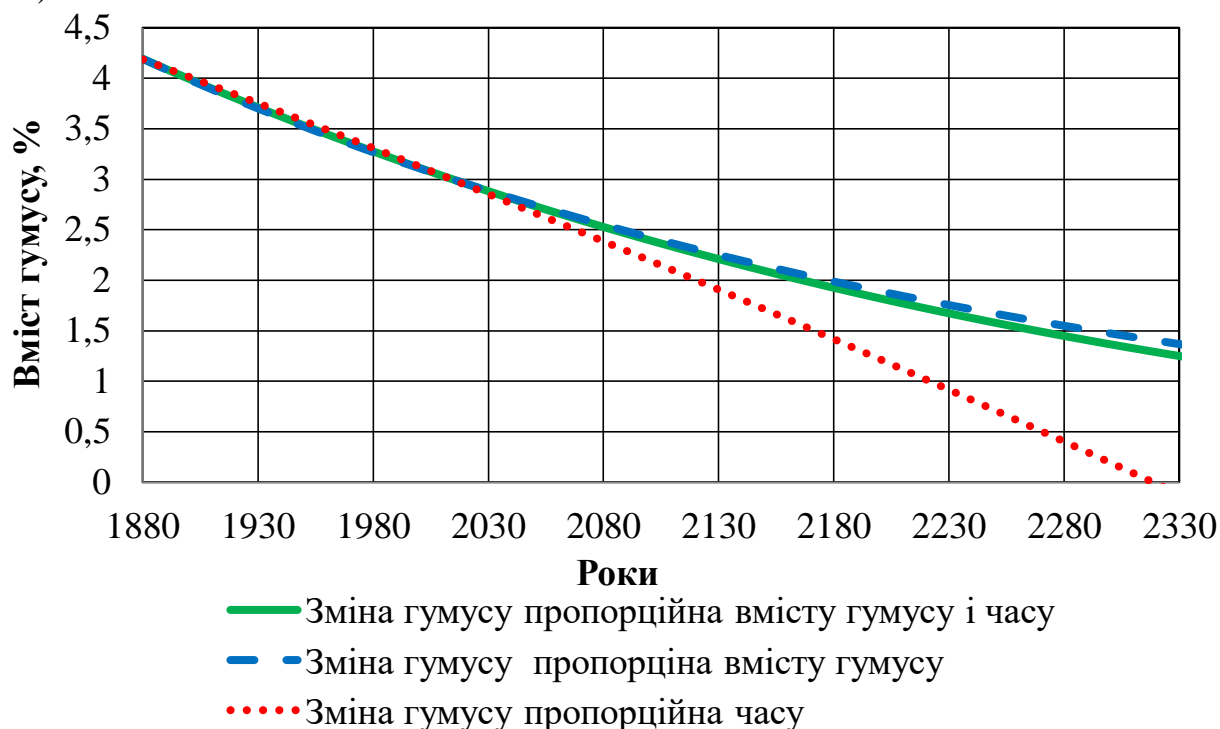


Рис. 1.13. Зміна вмісту гумусу в родючому шарі ґрунту

На основі аналізу графіка на рис 1.12. можна стверджувати, що вміст гумусу знизився в останні роки до 3% (в усіх трьох представлених моделях). Такі значення відповідають реальному гумусному стану ґрунтового середовища і є критичними [115, 116].

Тому, завдання біологічного землеробства забезпечити відтворення родючості ґрунту за рахунок внесення органічної речовини, що математично виражається виразом:

$$k_x X_t \leq k_{зм} П. \quad (1.40)$$

Виконання цієї умови може бути забезпечено за рахунок раціонального землевикористання та використання соломи.

Раціональне використання соломи передбачає такі заходи:

- солома залишається на полі і піддається гуміфікації з використанням компенсацийних доз азотних та фосфорних добрив;
- солома використовується для підстилки в корівниках і в подальшому солоmistий гній вноситься на поля як органічне добриво;
- солома використовується для підстилки в свинарниках і пташниках і в подальшому піддається компостуванню в штучних умовах для забезпечення знезараження та інактивації насіння бур'янів. Отриманий компост вноситься на поля як органічне добриво або використовується в технології вермикомпостування.

Самостабілізація вмісту гумусу у ґрунті (без внесення органічних речовин) відбудеться на рівні 1,1 % (відповідно до моделей, які передбачають обернено пропорційну залежність між зміною вмісту гумусу і вмістом гумусу та часом, а також зміною вмісту гумусу і вмістом гумусу) або взагалі відсутня (згідно моделі, яка передбачає обернено пропорційну залежність між зміною вмісту гумусу і часом). Представлена модель динаміки вмісту гумусу в родючому прошарку ґрунту є адекватною та дозволяє виконувати розрахунки вмісту гумусу в ґрунтах. Наближення розрахункових значень вмісту гумусу від фактичних значень (оцінене індексом детермінації) становить для сівозміни із багаторічними травами 0,938, а для сівозміни без багаторічних трав – 0,87.

1.5. Оцінка рівня енергетичної автономності сільськогосподарського виробництва

На основі структурної схеми функціонування агроєкосистеми (рис. 1.8) з урахуванням залежностей (1.9-1.14), та моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем (розділ 1.4) розроблено моделі функціонування агроєкосистеми з шестипільною сівозміною із виробництвом продукції та енергії, використанням біопалив та відновленням поживних речовин у ґрунті (рис. 1.14-1.16).

У моделі урожайність сільськогосподарських культур було прийнято згідно статистичних та довідкових даних [113, 114]. Кормова цінність продукції сівозміни визначена відповідно до існуючих методик у кормових одиницях [117, 118, 119], відповідно до виходу кормових одиниць було визначено поголів'я ВРХ, свиней та птиці. Вихід незернової частини урожаю прийнято згідно рекомендацій [19, 95, 120]. Нормативи виходу гною та посліду згідно вказаних у [119, 121]. Рецептура компосту розроблена згідно досліджень [122, 123, 124]. Внесення мінеральних добрив обґрунтовано згідно балансу поживних речовин [1, 95, 123, 125].

Структура використання продукції рослинництва прийнята згідно рекомендацій [126, 127, 128]. Показники тваринництва були прийняті згідно інформаційних джерел [119, 121, 127, 129].

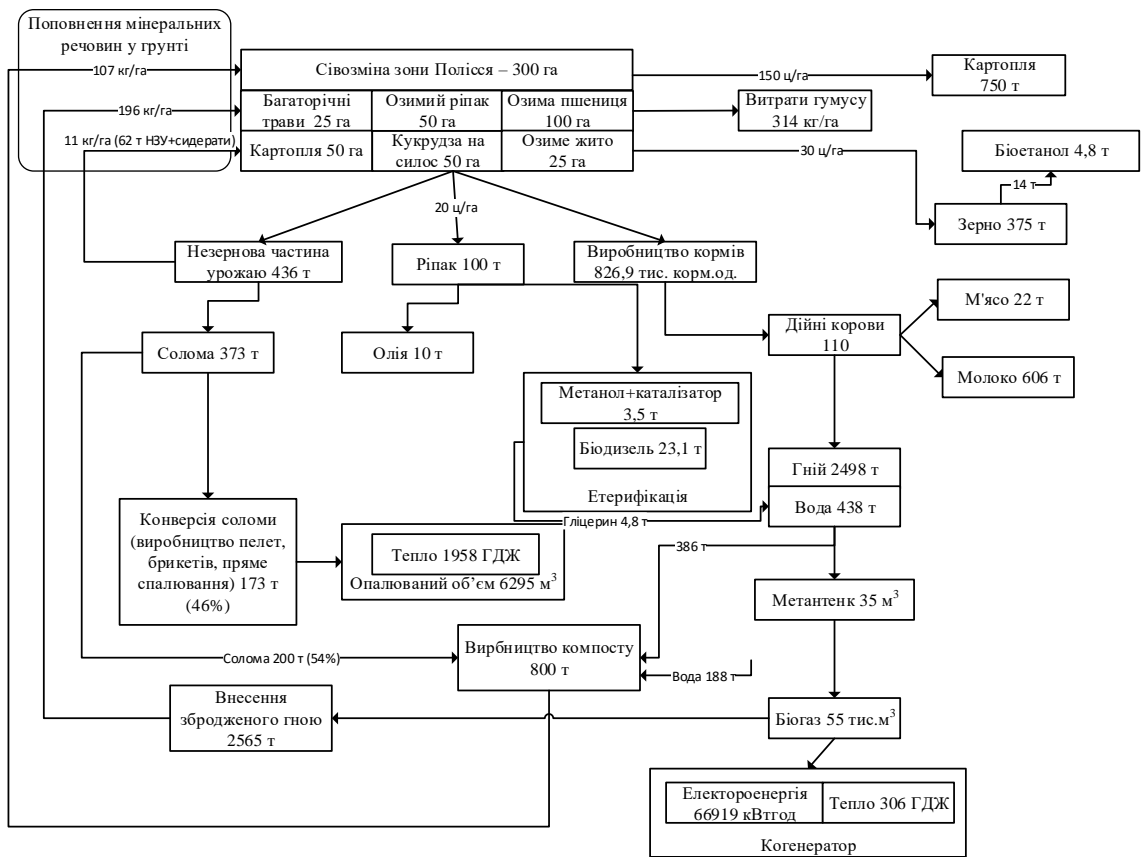


Рис. 1.14. Приклад схеми виробництва продукції та енергії у підприємствах зерно-молочної спеціалізації

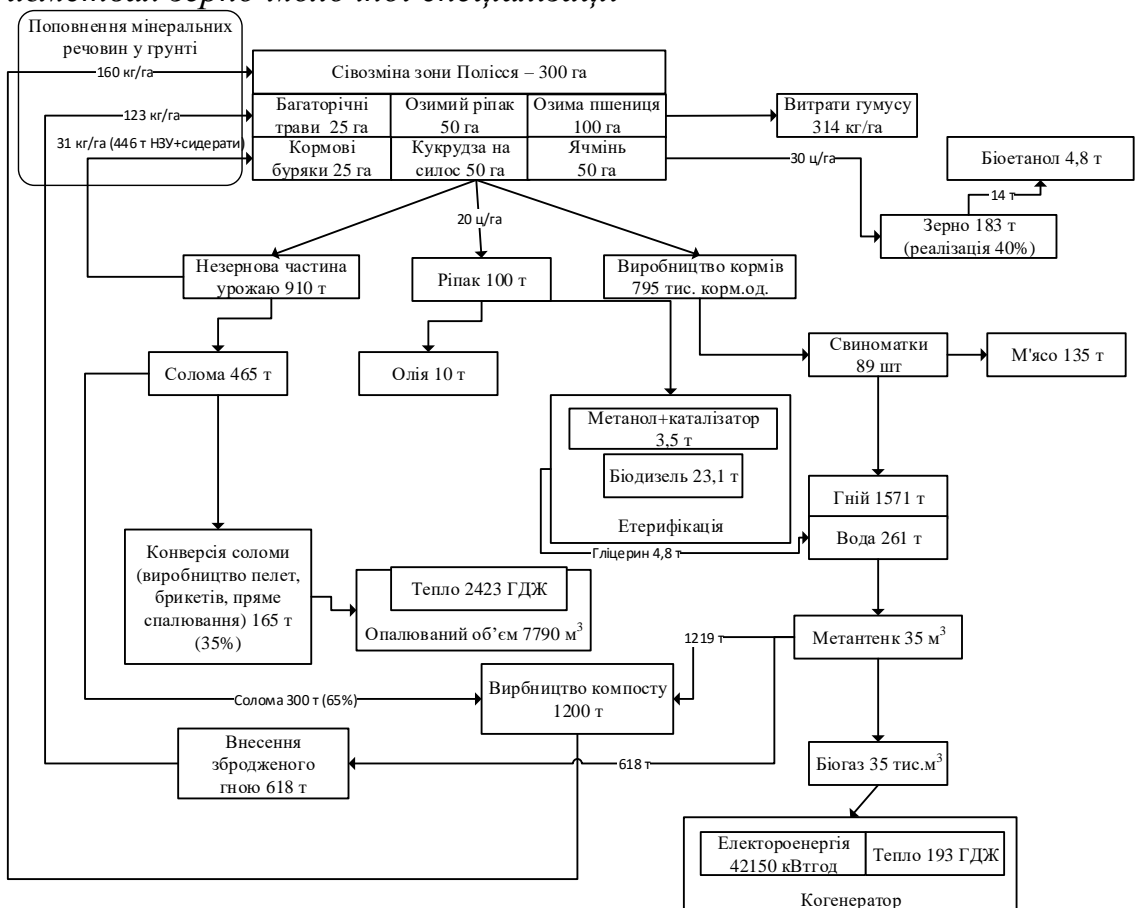


Рис. 1.15. Схема виробництва продукції та енергії у підприємствах зерно-свинарської спеціалізації

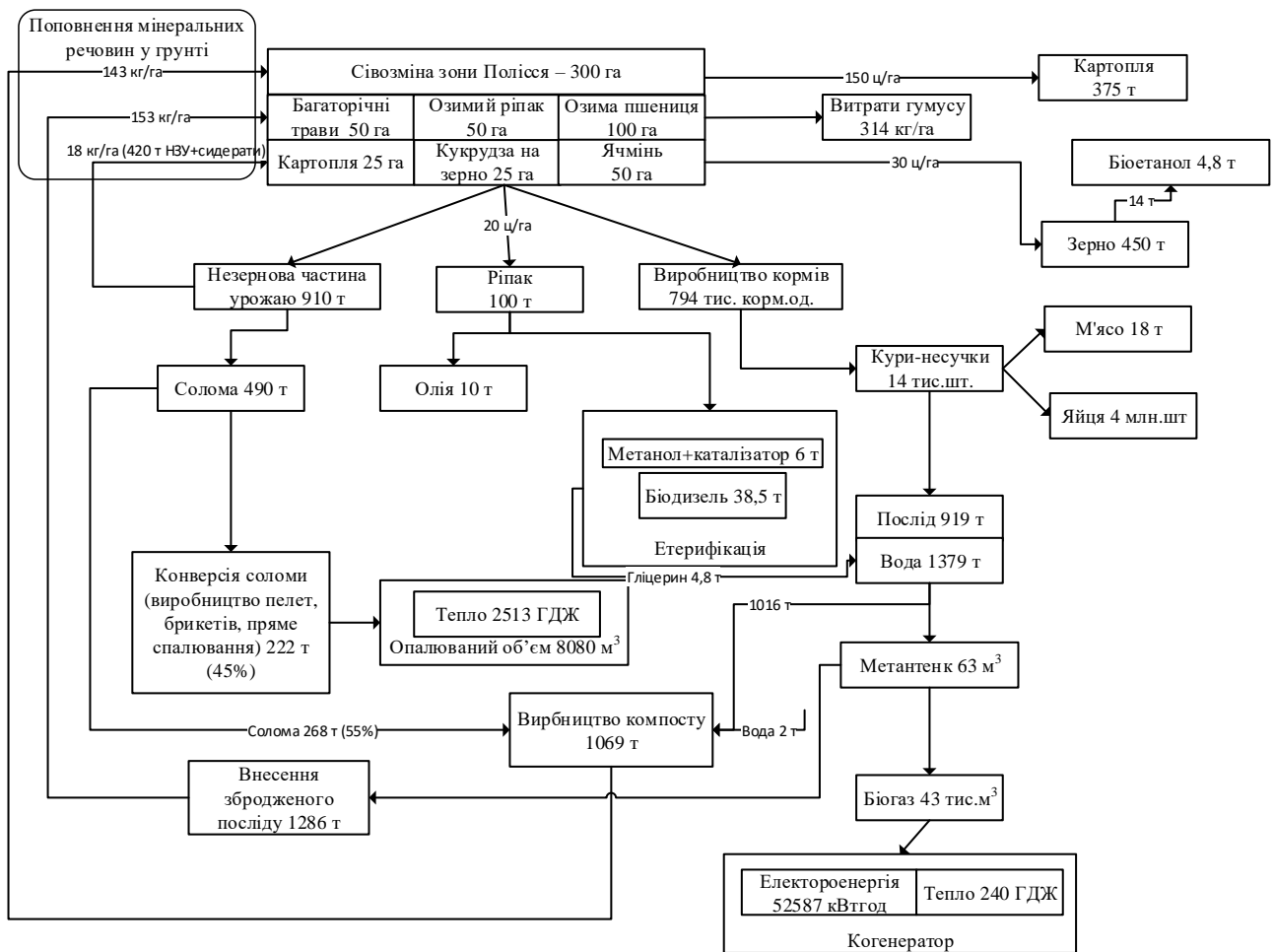


Рис. 1.16. Схема виробництва продукції та енергії у підприємствах зерно-птахівничої спеціалізації

На основі представлених схем розроблено комп'ютерну імітаційну модель функціонування агроєкосистеми із виробництвом біопалива, яка дала змогу встановити основні показники сільськогосподарського виробництва (при бездефіцитному балансі гумусу).

Аналіз структурних схем аграрного виробництва дозволяє встановити, що використання біоенергоконверсії в агроєкосистемах з використанням біопалива дає змогу забезпечити часткову автономність виробництва із збереженням родючості ґрунтів.

При використанні 100 % соломи для енергетичних потреб дефіцит балансу гумусу складе 140 кг/га для зерно-молочних підприємств, 398 кг/га для зерно-свинарських та 367 кг/га для зерно-птахівничих. Найменше значення показника для зерно-молочних підприємств пояснюється більшим обсягом виробництва органічних добрив в порівнянні із іншими типами сільськогосподарських підприємств.

Крім того, при виробництві біоетанолу та дизельного біопалива в обсягах передбачених пропонованою моделлю (рис. 1.14-1.16), можливе повне забезпечення потреб в межах агроєкосистеми в рідкому біопаливі при умові, що

питомі витрати не будуть перевищувати 16 кг/га біоетанола та 77 кг/га дизельного біопалива.

Аналізуючи вищенаведене можна зробити висновок, що необхідно вишукувати додаткові резерви забезпечення енергоавтономності агроєкосистем. Це можуть бути, як зовнішні резерви: використання геліоколекторів та вітроелектростанцій; так і внутрішні: вибір раціональних технологій вирощування та виробництва сільськогосподарської продукції, мінімізація питомої енергомісткості машин та обладнання з урахуванням якісних показників їх роботи [78, 130, 131].

Подальше підвищення рівня енергетичної автономності агроєкосистем потребує мінімізації питомої енергомісткості машин та обладнання, що використовуються при виробництві та конверсії органічної сировини з урахуванням якісних показників.

1.6. Наукова концепція механіко-технологічного обґрунтування енергетичної автономності агроєкосистем

Очевидно, що агроєкосистема – нестала система, що має певний склад, структуру й режим, які підтримуються і регулюються антропогенною діяльністю. В результаті агроєкосистема може поступово втрачати свої властивості.

Тому важливо формалізувати та оцінити, який вплив на ефективність агроєкосистеми здійснюють параметри машин та обладнання, а також техніко-економічні показники технологій, що здійснюються в межах агроєкосистеми (таблиця 1.10).

Крім того, аналізуючи процеси, що протікають в межах агроєкосистем, необхідно враховувати, що ґрунти є одночасно умовою і результатом сільськогосподарської діяльності, а також вони пов'язують у просторі і часі природні й економічні межі агроєкосистем, тому, в першу чергу, необхідно оцінювати агроєкосистему за впливом її складових на баланс гумусу.

Значний вплив на енергетичну ефективність агроєкосистеми чинять параметри робочих органів машин і обладнання, які можна розділити на дві групи:

- параметри, що визначають показники роботи обладнання для виробництва біопалива;

- параметри, що визначають агротехнічні показники роботи сільськогосподарських машин при вирощуванні та збиранні сільськогосподарських культур, а також при утриманні тварин та птиці.

Враховуючи, що підтримання балансу гумусу в ґрунтах є визначальним фактором при використанні сировини сільськогосподарського походження на енергетичні потреби, можна встановити граничні значення обсягів сировини для виробництва біопалива. Визначення можливого обсягу сировини для виробництва біопалива дає можливість ефективного узгодження харчових, сировинних та енергетичних потреб із можливостями агроєкосистем при

одночасному акумулюванні гумусу та утриманні й розширенні біологічного різноманіття біоценозів. Таке поєднання дозволить проводити виробництво біопалив у агросистемах із отриманням високоякісної та екологічно безпечної продукції.

Таблиця 1.10

Механіко-технологічні особливості виробництва біопалива та отримання енергії в межах агроєкосистеми

Переваги	Проблеми
1	2
Виробництво біогазу	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво поновлюваної енергії; – виробництво екологічно чистих органічних добрив; – покращення санітарно-епідеміологічного стану довкілля; – широка різноманітність сировини, яка може застосовуватися для роботи біогазових установок. 	<ul style="list-style-type: none"> – розшарування маси субстрату, що значно знижує ефективність виділення метану; – високі енерговитрати на перемішування субстрату.
Отримання теплової енергії	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво поновлюваної енергії; – наявність великого ресурсного потенціалу сировини доступної для конверсії у теплову енергію. 	<ul style="list-style-type: none"> – відсутня структура техно-логічного процесу конверсії (спалювання чи переробки) незернової частини врожаю – соломи; – відсутні технічні засоби для дрібнотоварного спалювання соломи; – не вирішені проблеми рівно-мірності згоряння соломи в топці котла.
Виробництво дизельного біопалива	
<ul style="list-style-type: none"> – виробництво екологічно чистого палива для дизельних двигунів; – наявність великого ресурсного потенціалу для виробництва дизельного біопалива. 	<ul style="list-style-type: none"> – складність технологій отримання дизельного біопалива; – існуюче обладнання не забезпечує необхідну ефективність протікання реакції метанолізу; – високі енергозатрати на перемішування емульсії.

Вирішення інженерних проблем, щодо виробництва і використання біопалива, дозволить отримати практичний досвід, наукові напрацювання та закономірності для визначення конструктивно-технологічних параметрів машин та обладнання; узгодити та формалізувати взаємозв'язки між суміжними галузями аграрного виробництва щодо використання органічної сировини; зменшити закупівлі непоновлюваних викопних видів палива; підвищити рівень зайнятості сільського населення (шляхом створення додаткових робочих місць для виробництва біопалива); покращити екологічний стан природного середовища (шляхом зменшення викидів токсичних речовин та парникових

газів). Все вищеприведене дозволить підвищити рівень енергетичної автономності агроєкосистем.

Крім того, підвищення рівня енергетичної автономності агроєкосистем потребує мінімізації питомої енергомісткості машин та обладнання, що використовуються при виробництві та конверсії органічної сировини, з урахуванням якісних показників кінцевої продукції.

Комплексне розв'язання завдань виробництва біопалива на основі сировини сільськогосподарського походження, що полягає у подоланні протиріччя, суть якого в тому, що збільшення виробництва енергії, призводить до зменшення виробництва продуктів харчування та до погіршення екологічного стану агроєкосистеми що, насамперед, виражається у дегуміфікації ґрунтового середовища, не було формалізовано достатньою мірою. Крім того, для ефективного розв'язання завдань функціонування агроєкосистеми недостатньо існуючих закономірностей для визначення конструкційно-технологічних параметрів відповідних машин та обладнання, що дали б змогу підвищити ефективність виробництва шляхом удосконалення й отримання нових екологічно безпечних технологічних процесів, засобів механізації та обладнання для виробництва біопалива та отримання енергії.

Наукову гіпотезу можна сформулювати так: підвищення енергетичної ефективності агроєкосистем із збереженням необхідного рівня виробництва високоякісних та екологічно безпечних продуктів харчування та із відтворенням родючості ґрунтів може бути досягнуто як виробництвом біопалива, так і завдяки зниженню енергоємності та підвищенню якості роботи технічних засобів, що забезпечують конверсію сировини сільськогосподарського походження в енергетичні ресурси – газоподібне, рідке та тверде біопаливо.

1.7. Висновки до розділу 1

При дотриманні позитивного балансу гумусу енергоавтономність агроєкосистеми складе: 2,74 %, 2,2 %, 14,5 % електричної енергії та 14,6 %, 13,3 %, 32,8 % теплової енергії для зерно-молочних, зерно-свинарських та зерно-птахівничих типів сільськогосподарських підприємств, відповідно. Значення для зерно-птахівничих підприємств пояснюються порівняно низькими питомими енерговитратами для утримання птахів. Використання біомаси в якості енергоресурсу стає можливим для сільськогосподарських підприємств при досягненні урожайності озимої пшениці $u_3 \geq 25 \dots 27$ ц/га.

З огляду на низький рівень можливої енергетичної автономності агроєкосистем необхідно вишукувати додаткові резерви забезпечення енергоавтономності агроєкосистем. Це можуть бути як зовнішні резерви: використання геліоколекторів та вітроелектростанцій, так і внутрішні: вибір раціональних технологій вирощування та виробництва сільськогосподарської продукції, мінімізація питомої енергоємності машин та обладнання з урахуванням якісних показників їх роботи.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕНЕРГОРЕСУРСІВ

2.1. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертових реакторів

Експлуатація біогазових установок показує, що сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату. Однак, при цьому інтенсивного перемішування слід уникати оскільки це може призвести до припинення анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу [132]. У той же час, досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що практично неможливо усунути розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та органічну плаваючу біомасу, що вказує на недоліки в роботі систем перемішування біомаси [133, 134].

В результаті наукових досліджень в НУБіП розроблено ряд запатентованих технічних рішень, які дозволяють у значній мірі усунути розшарування біомаси за рахунок забезпечення перемішування шарів біомаси із використанням занурених обертових біогазових реакторів. Визначено рівень занурення обертового метантенка в рідину (відстань від його центра обертання до рівня рідини в яку він занурений), а також коефіцієнт його заповнення (відстань від центра обертового метантенка до рівня біомаси в ньому) від геометричних параметрів обертового метантенка та густини рідини, в яку занурений обертовий метантенк при забезпеченні його знаходження у завислому стані [135]. Однак питання визначення енергомісткості обертання реактора у завислому стані зануреним у воду (рис. 2.1) потребує проведення додаткових досліджень.

Для недопущення розшарування біомаси та забезпечення її перемішування шляхом підняття мінеральної складової біомаси, яка накопичується в нижній частині метантенка та занурення органічної складової біомаси, яка накопичується в верхній частині метантенка, необхідно мати значення переміщення та відносної швидкості мінеральних та органічних частинок складових біомаси на перемішуючих лопатках обертового метантенка.

Для визначення відносної швидкості та встановлення траєкторії руху мінеральних частинок біомаси виходячи із рис. 2.2 складено диференціальні рівняння руху мінеральних частинок субстрату у вигляді матеріальної точки по лопатках обертового метантенку.

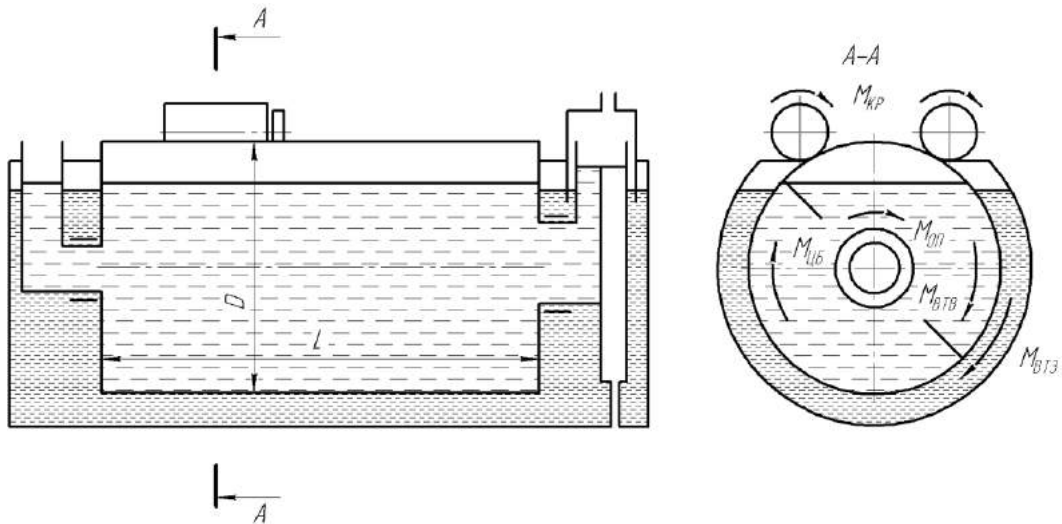


Рис. 2.1. Схема обертового реактора:

D – внутрішній діаметр реактора, м; L – робоча довжина реактора, м; M_{KP} – крутний момент для забезпечення обертання реактора, Н·м; M_{OP} – момент опору підшипникових вузлів, Н·м; $M_{BTЗ}$ – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурений реактор, Н·м; M_{BTV} – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідину біомасу, яка знаходиться в реакторі, Н·м; $M_{ЦБ}$ – момент, необхідний для забезпечення циркуляції біомаси в реакторі, Н·м.

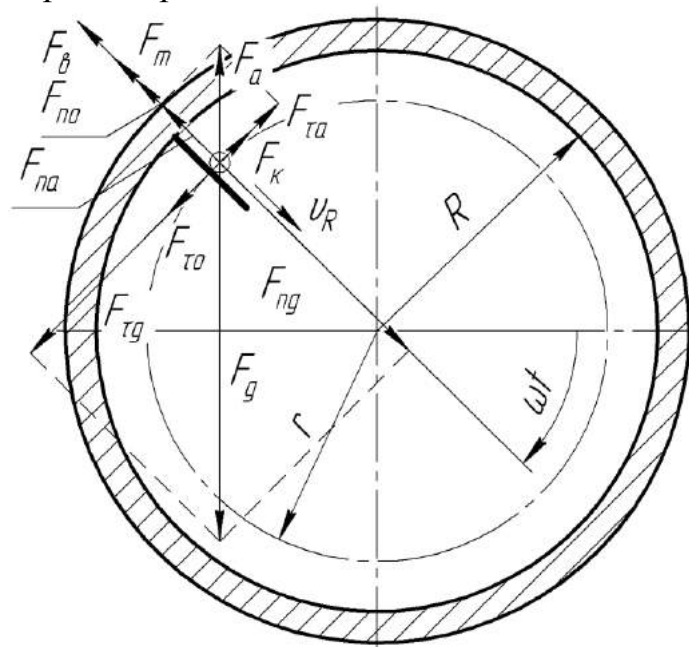


Рис. 2.2. Схема дії сил на мінеральну частинку субстрату, що взаємодіє із лопаткою всередині обертового метантенка:

F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_m – сила тертя, Н; F_k – коріолісова сила інерції, Н; $F_с$ – відцентрова сила інерції, Н; $F_по$ – сила опору субстрату, яка протидіє руху частинки у радіальному напрямку, Н; $F_тo$ – сила, що притискує частинку до лопатки завдяки опору субстрату, Н; r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; v_R – відносна швидкість органічної частинки під час руху по лопатці, м/с; R – внутрішній радіус метантенка, м; ωt – кут повороту метантенка, рад.

Так, при граничних значеннях $R=2,15$ м і $k_3=0,946$, умова плавання реактора буде забезпечуватись при $L>7,5$ м. Причому, повне занурення реактора буде при $L=7,5$ м, а при $L>7,5$ м буде спостерігатись часткове занурення біореактора (рис. 2.26).

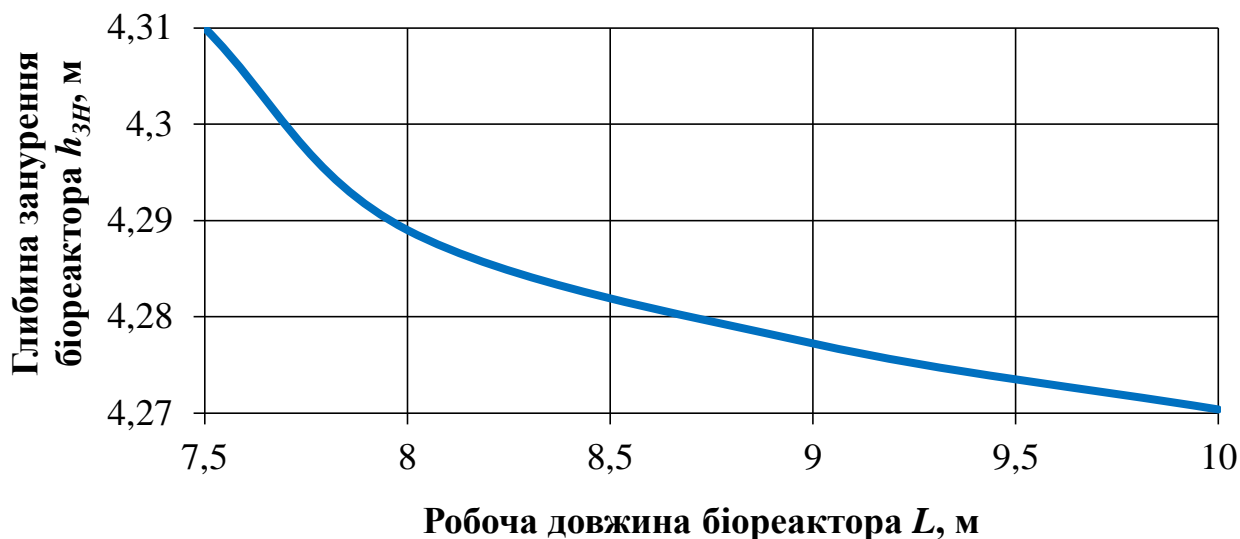


Рис. 2.26. Залежність глибини занурення метантенку від його робочої довжини (внутрішній радіус $R=2,15$ м і коефіцієнт заповнення $k_3=0,946$)

Виконавши відповідні розрахунки згідно із рівняннями (2.88), (2.90), (2.93), (2.95) та із врахуванням умов міцності [139, 140] і економічності [48, 144] можна встановити раціональні параметри ряду метантенків із мінімальними питомими енерговитратами (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3

Раціональні конструкційні параметри обортових біореакторів

Внутрішній радіус R , м	Товщина стінок (рекомендована) s , м	Об'ємна маса матеріалу конструкції (максимальна) ρ_m , кг/м ³	Гранична робоча довжина L , м	Коефіцієнт заповнення біомасою k_3	Об'єм завантаженої біомаси (максимальний) V_B , м ³	Потужність на обертання N_{KR} , Вт	Питома потужність N_L , Вт/м ³
0,5	0,003	3000	4,0	0,941	2,96	299,01	101,14
1,0	0,005	3000	4,0	0,941	11,82	1197,02	101,23
1,5	0,005	4000	4,0	0,941	26,61	2661,06	100,02
2,0	0,005	4500	6,0	0,945	71,25	7114,66	99,85
2,15	0,005	4830	7,5	0,946	103,03	10408,95	101,02

Використання параметрів наведених в таблиці 2.3 дозволяє проектувати обортові біореактори із мінімальними питомими енерговитратами на перемішування біомаси.

2.3. Аналіз процесів утворення та горіння генераторного газу в котлах із верхнім горінням

В Україні виробляються теплогенератори з повітряним теплоносієм для спалювання соломи, які можна агрегатувати з сушарками та використовувати для опалення теплиць й виробничих приміщень, водонагрівальні котли для обігріву виробничих приміщень та соціально-культурних об'єктів; котли-теплогенератори для спалювання відходів деревообробки [145, 146, 147].

Проте при спалюванні рослинної біомаси виникають деякі труднощі пов'язані із неоднорідністю біомаси, як палива, відносно високою вологістю, малим питомим енерговмістом, низькою температурою плавлення золи [148, 149, 150, 151].

Тому, у зоні горіння рослинної біомаси необхідно створити сприятливі умови для повного згорання соломи без плавлення золи та із підтримання рівномірного процесу виділення тепла. Таких умов можна досягнути застосувавши котли, що мають дві робочі зони: першу - утворення генераторного газу та другу - горіння генераторного газу (рис.2.27) [152]. В таких котлах є можливість регулювання процесом тепловиділення за рахунок зміни об'ємів повітря, що надходить в робочі області котла.

Проаналізуємо процес отримання генераторного газу в першій зоні котла. Дослідження [153] вказують, що газоутворенням є процес перетворення горючої частини палива в газ при взаємодії вуглецю палива з киснем в зоні високих температур. Джерелом кисню, необхідного для отримання газу з палива є повітря. В техніці, залежно від використаного типу дугтя, існують наступні генераторні гази: повітряний, водяний, змішаний і парокисневий [154].

В пропонованому котлі в першій зоні отримується повітряний газ що складається з оксиду вуглецю і азоту (теплота згорання за нормальних умов становить 4436 кДж/м^3), через взаємодію вуглецю з сухим повітрям, що подається нижньою секцією розпилювача повітря [155]. Крім того, при подачі в котел повітря, що містить водяну пару утворюється змішаний газ наступного складу: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 [156].

Припустимо, що в першій зоні котла протікає змішаний процес газоутворення [154, 155, 156].

Виходячи з того, що вміст азоту в рослинній біомасі незначний (0,3...0,6%) [147], витрата повітря яке надходить із нижньої секції розпилювача становитиме:

$$V_{\text{воз}} = \frac{N_2^c \cdot V_{\text{гг}}}{79}, \quad (2.98)$$

де $V_{\text{воз}}$ – витрати повітря на утворення газу, $\text{м}^3/\text{год}$; $V_{\text{гг}}$ – вихід генераторного газу, $\text{м}^3/\text{год}$.

Виходячи з продуктивності котла за газом $V_{\text{гг}}$ годинні витрати рослинної біомаси G_b становлять [157]:

$$G_b = \frac{V_{\text{гг}}}{\nu_c}, \quad (2.99)$$

де G_6 – годинні витрати рослинної біомаси на утворення газу, кг/год; v_c – питомий вихід сухого газу, м³/кг.

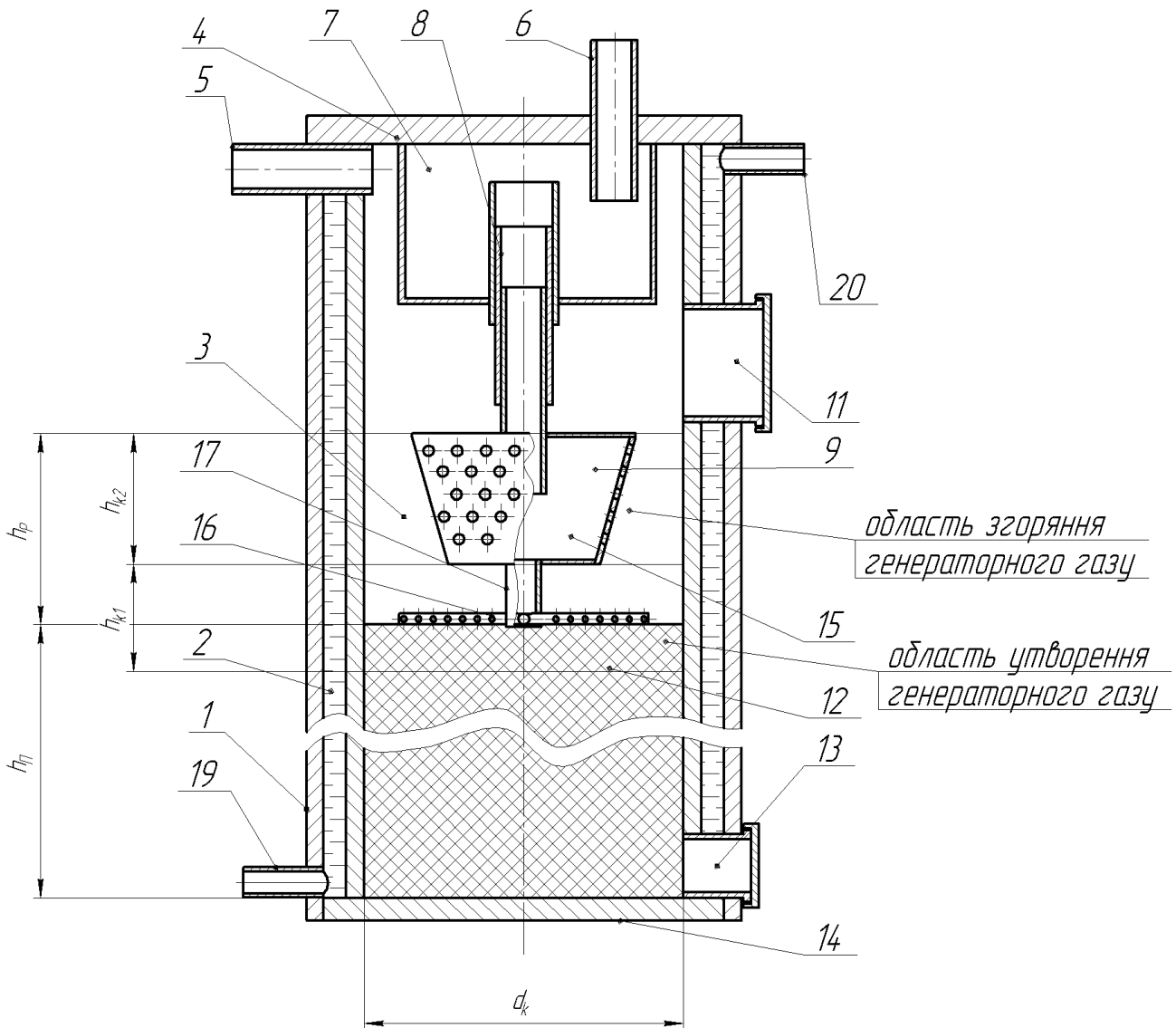


Рис. 2.27. Схема котла для спалювання соломи із верхнім горінням:

1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – камера згорання; 4 – кришка; 5 - патрубок для видалення продуктів згорання; 6 – патрубок для подачі повітря, 7 - проміжна ємкість; 8 – напрямна; 9 - розподільник повітря; 10 - отвори, 11 – дверцята для палива; 12 – паливо; 13 – дверцята для попілу; 14 – днище; 15 - верхня секція розподільника повітря; 16 - нижня секція розподільника повітря; 17 – з'єднувач 18 – трубчасті елементи; 19 – патрубок для подачі холодної води; 20 – патрубок для відведення гарячої води; d_k – діаметр котла; $h_п$ – висота палива; h_p – висота розпилювача повітря; $h_{к1}$ – висота області утворення генераторного газу; $h_{к2}$ – висота області згорання генераторного газу.

Вихід газу із кілограма біомаси (або питомий вихід сухого газу) визначається, як:

Таблиця 2.5

Основні параметри розподільника повітря в область спалювання генераторного газу (при швидкості витікання повітря в область спалювання газу $v_{Hl}=0,2$ м/с)

Теоретична теплова потужність котла P_k , кВт	Витрати повітря на спалювання генераторного газу V_{od} , м ³ /год	Кількість отворів для подачі повітря в область спалювання n_B	Діаметр отворів для подачі повітря в область спалювання d_{B0} , мм	Висота розподільника h_e , мм	Сторона основи розподільника на виході $a_{B,M}$	Сторона основи розподільника на виході $a_{B0,M}$	Діаметр вхідного отвору $d_{Вех}$, мм	Діаметр вихідного отвору $d_{Ввих}$, мм	Опір розподільника $\Delta p_{ВЛ}$, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10,3	40	21	91	0,4	0,24	90	60	0,06
20	20,6	80	21	117	0,6	0,24	90	60	0,22
30	30,9	120	21	209	0,6	0,24	90	60	0,50
40	41,3	160	21	302	0,6	0,24	90	60	0,88
50	51,6	200	21	393	0,6	0,24	90	60	1,38
60	61,9	240	21	342	0,8	0,24	90	60	1,99
70	72,2	280	21	417	0,8	0,24	90	60	2,71
80	82,5	320	21	342	1	0,32	120	80	1,12
90	92,8	360	21	401	1	0,32	120	80	1,42
100	103,1	400	21	460	1	0,32	120	80	1,75
110	113,5	440	21	519	1	0,32	120	80	2,12
120	123,8	480	21	577	1	0,32	120	80	2,52
130	134,1	520	21	498	1,2	0,32	120	80	2,96
140	144,4	560	21	528	1,2	0,4	150	100	1,40
150	154,7	600	21	577	1,2	0,4	150	100	1,61
160	165,0	640	21	625	1,2	0,4	150	100	1,83
170	175,4	680	21	674	1,2	0,4	150	100	2,07
180	185,7	720	21	722	1,2	0,4	150	100	2,32
190	196,0	760	21	770	1,2	0,4	150	100	2,59
200	206,3	800	21	818	1,2	0,4	150	100	2,87

Таблиця 2.6

**Основні розрахункові параметри котлів для спалювання біомаси
(солома зернових)**

Теоретична теплова потужність P_k , кВт	Витрати біомаси за добу G_b , кг	Загальні витрати повітря $V_{заг}$, м ³ /с	Кількість завантажень $n_{заг}$	Діаметр топки D_{TK} , м	Висота топки H_{TK} , м	Висота загальна H_k , м
10	66,7	0,00369	2	0,48	1,32	1,68
20	133,3	0,00738	2	0,72	1,17	1,58
30	200,0	0,01108	2	0,96	0,99	1,59
40	266,7	0,01477	3	0,96	0,88	1,66
50	333,3	0,01846	3	0,96	1,10	2,06
60	400,0	0,02215	3	0,96	1,32	2,18
70	466,6	0,02584	3	0,96	1,53	2,55
80	533,3	0,02954	3	1,2	1,57	1,7
90	600,0	0,03323	3	1,2	1,77	2,81
100	666,6	0,03692	3	1,2	1,96	3,12
110	733,3	0,04061	3	1,2	2,16	3,44
120	800,0	0,04430	3	1,2	2,36	3,75
130	866,6	0,04800	3	1,44	1,77	3,01
140	933,3	0,05169	3	1,44	1,91	3,27
150	999,9	0,05538	4	1,44	1,53	2,99
160	1066,6	0,05907	4	1,44	1,64	3,19
170	1133,3	0,06276	4	1,44	1,74	3,39
180	1199,9	0,06645	4	1,44	1,84	3,59
190	1266,6	0,07015	4	1,44	1,94	3,78
200	1333,3	0,07384	4	1,44	2,05	3,98

В результаті теоретичних досліджень, отримано параметри котлів, що забезпечують мінімізацію втрат енергії при спалюванні біомаси за рахунок розділення робочої області на зону утворення генераторного газу та зону його спалювання. Витрати біомаси G_b в таких котлах змінюються в межах від 66,7 ($P_k=10$ кВт) до 1333,3 кг/добу ($P_k=200$ кВт), при кількості завантажень від 2 до 4-х на добу. Висота котла змінюється в межах від 1,58 ($P_k=20$ кВт) до 3,98 м ($P_k=200$ кВт), а діаметр топки котла від 0,48 м ($P_k=10$ кВт) до 1,44 м (P_k від 130 до 200 кВт).

2.5. Аналіз процесу отримання дизельного біопалива та обґрунтування основних параметрів циркуляційних реакторів-розділювачів

Біодизель або метилові ефіри жирних кислот одержують у процесі етерифікації, а саме з тригліцеридів олій при хімічній реакції алкоголізу [166, 167, 168].

Відомо, що реакція алкоголізу найбільш повно (до 98%) проходить при застосуванні метанолу, а із збільшенням молекулярної маси спирту вона значно сповільнюється та протікає неповністю (у етанолу та пентанолу складає всього 35,3 і 11,5 % за масою, відповідно) [169], тому реакцію отримання метилових ефірів жирних кислот можна назвати метанолізом.

Найбільш широкого застосування набув метаноліз олій із лужним каталізатором [170, 171, 172, 173], при якому процес отримання біопалива проходить при температурі 20 – 70°C. При цьому використовують лужні каталізатори NaOH та KOH у кількості від 0,3% до 1,5% за масою тригліцеридів олії.

Після етерифікації відбувається операція розділення гліцеринової та ефірної фаз. Найпростіший та найменш енергозатратний спосіб розділення – це осадження більш важкої фракції.

Враховуючи, що метанол слабо розчиняється у рослинній олії [174], після додавання розчину метилового спирту у олію, рідини розташовуються шарами відповідно значенню їх густин. Тому, необхідно виконувати перемішування, що призводить до утворення двофазної системи – емульсії, у якій суцільне середовище – рослинна олія та дисперсійна фаза – розчин метанолу із лужним каталізатором. Очевидно, щоб утримувати емульсію у дисперсійному стані її необхідно безперервно перемішувати (турбулізувати) [175]. Хід процесу турбулізації залежить від гідродинамічних умов [176].

Чим більша міжфазна поверхня, тим швидше проходить етерифікація, так як вона утворює поверхню контакту реагентів. Проте, інтенсивне перемішування призводить до завчасного руйнування міжфазної поверхні, що в свою чергу не дозволяє відбутися реакції метанолізу в повній мірі. Тому, необхідно спочатку забезпечити рівномірне пошарове перемішування емульсії в області «перемішування», або «утворення дисперсійного стану емульсії». В подальшому необхідно провести проходження реакції етерифікації в умовах меншого рівня турбулізації суспензії в області «проходження реакції» [2, 177].

Процес перемішування характеризується двома основними чинниками: ефективністю перемішування і витратою енергії [175, 176]. Під ефективністю перемішування розуміють якість результату, яка досягається за часом, тобто рівномірність розподілу концентрацій середовищ, що перемішуються.

З огляду на ресурсоощадність та енергоефективність раціональні параметри технологічного процесу етерифікації повинні відповідати встановленим параметрам: температура до 40°C; співвідношення спирту до олії

6:1; кількість каталізатору 1%; інтенсивність перемішування 1,8 Вт/л; тривалість процесу 40 хвилин [178, 179].

Для процесу етерифікації рослинних олій з метою отримання дизельного біопалива пропонується циркуляційне перемішування, що здійснюється багатократним перекачуванням рідини по замкненому контуру. До схеми циркуляційного перемішування належать: посудина – циркуляційний перемішувач-розділювач (рис. 2.35), циркуляційний насос, трубопроводи, запірно-регулююча апаратура.

Завдяки тому, що форсунки встановлені в корпусі циркуляційного розділювача на одному рівні по висоті, і орієнтовані таким чином, щоб при перекачуванні емульсії утворювати турбулентний круговий потік емульсії у його верхній частині, забезпечується рівномірне пошарове перемішування емульсії в зоні розміщення форсунок. При відкачуванні емульсії з нижньої частини циркуляційного розділювача перемішаний шар емульсії опускається нижче, забезпечуючи проходження реакції етерифікації в умовах меншого рівня турбулізації суспензії. За рахунок цього досягається підвищення якості дизельного біопалива.

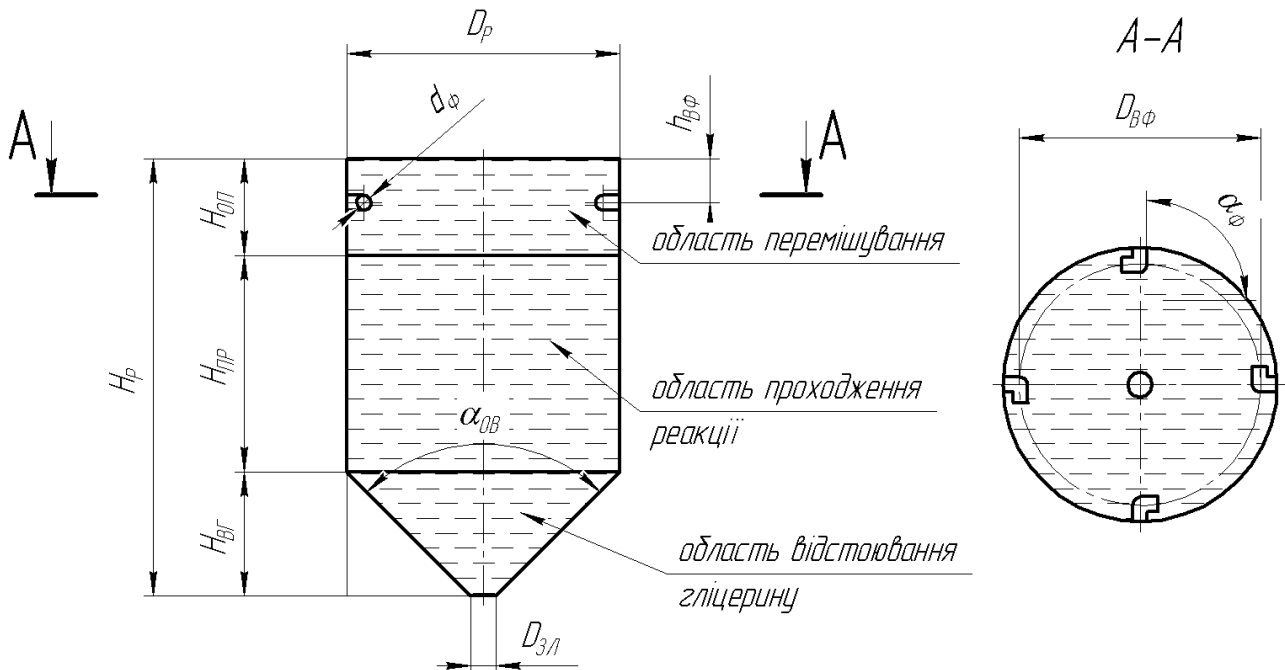


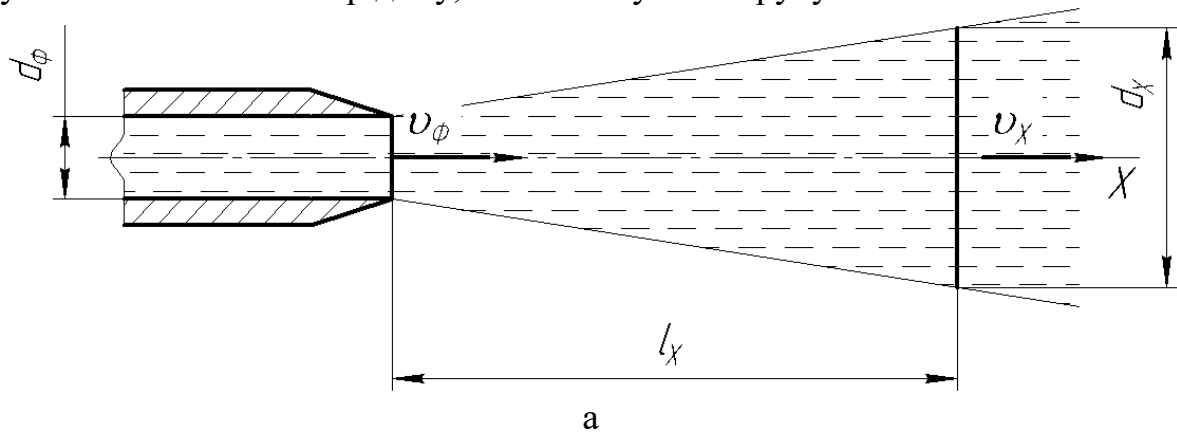
Рис. 2.35. Схема циркуляційного змішувача-розділювача:

H_p – висота розділювача, м; $H_{оп}$ – висота області перемішування, м; $H_{пр}$ – висота області проходження реакції, м; $H_{вг}$ – висота області відстоювання гліцерину, м; D_p – робочий діаметр розділювача, м; $D_{вф}$ – діаметр встановлення форсунок, м; $d_{ф}$ – діаметр сопла форсунки, м; $h_{вф}$ – висота встановлення форсунок, м; $D_{зл}$ – діаметр отвору для зливання гліцерину, м; $\alpha_{об}$ – конусність області відстоювання, рад; $\alpha_{ф}$ – кут встановлення форсунки, рад.

При використанні форсунок, струмінь емульсії, що витікає із сопла, розширюється в напрямку виходу струменя (рис. 2.36). Це викликано наступними чинниками [175, 176]:

1. Потік рідини, що витікає із сопла, штовхає перед собою емульсію, яка знаходиться в посудині попереду сопла.

2. Прошарки рідини, що знаходяться навколо струменя, за рахунок тангенційних напружень між прошарками емульсії, які рухаються з різними швидкостями, а також турбулентним проникненням елементарних частинок струменя в навколишню рідину, також набувають руху.



б

Рис. 2.36. Теоретичний (а) та дійсний (б) профіль струменя, що витікає із форсунки в емульсію:

d_ϕ – діаметр сопла форсунки, м; d_x – діаметр струменя на відстані l_x від форсунки, м; v_ϕ – швидкість витікання емульсії із форсунки, м/с; v_x – середня швидкість струменя емульсії на відстані l_x від форсунки, м/с.

Враховуючи рівняння:

$$\sum m_\phi v_\phi = \sum m_x v_x, \quad (2.124)$$

де v_ϕ – середня швидкість витікання емульсії із форсунки; v_x – середня швидкість струменя на відстані l_x від форсунки, м; m_ϕ – маса елементарних частинок струменя при витіканні із форсунки, кг; m_x – маса елементарних частинок струменя на відстані l_x від форсунки, м. можна зробити висновок, що струмінь, який виходить із форсунки, постійно розширюється та збільшується витрата рідини Q_x в ньому.

Основні теоретичні параметри циркуляційного перемішувача в області перемішування біомаси

Внутрішній діаметр посудини D_P , м	Діаметр встановлення форсунок $D_{ВФ}$, м	Діаметр сопла форсунки $d_{ф}$, мм	Висота області перемішування $H_{ОП}$, мм	Висота встановлення форсунок $h_{ВФ}$, м	Кількість форсунок $n_{ф}$, шт	Тиск у форсунці $P_{ф}$, МПа	Подача насоса $Q_{нас}$, м ³ /с	Теоретична потужність насоса W_T , Вт
0,49	0,45	25	42	21	4	0,01	0,0043	42,6
0,81	0,75	30	60	30	4	0,01	0,0061	61,3
1,26	1,18	35	82	41	4	0,01	0,0083	83,4
0,50	0,46	20	38	19	4	0,02	0,0039	77,1
0,92	0,87	25	59	30	4	0,02	0,0060	120,4
1,56	1,48	30	86	43	4	0,02	0,0087	173,4
0,71	0,66	20	46	23	4	0,03	0,0047	141,6
1,36	1,29	25	73	36	4	0,03	0,0074	221,2
2,31	2,20	30	105	53	4	0,03	0,0106	318,6
0,93	0,88	20	54	27	4	0,04	0,0054	218,0
1,78	1,69	25	84	42	4	0,04	0,0085	340,6
3,03	2,92	30	121	61	4	0,04	0,0123	490,5
1,14	1,08	20	60	30	4	0,05	0,0061	304,6
2,21	2,11	25	94	47	4	0,05	0,0095	476,0
3,77	3,64	30	136	68	4	0,05	0,0137	685,5

Інші параметри гідродинамічного розділювача (висота H_P , висота області проходження реакції $H_{ПР}$, висота області відстоювання гліцерину $H_{ВГ}$) можна визначити згідно до встановлених типорозмірів корпусів вертикальних апаратів з конічним днищем з кутом при вершині конуса $\alpha_{ОВ}=90^0$ [184, 185].

2.6. Висновки до розділу 2

1. Коефіцієнт заповнення збільшується по мірі збільшення внутрішнього радіуса реактора від 0,5 до 2,15 м в діапазоні від 0,89 до 0,946. Причому, встановлено раціональний радіус метантенка ($R=2,15$ м), що забезпечує мінімальні енерговитрати ($N=6912$ Вт) на обертання метантенка, в широкому діапазоні коефіцієнту завантаження ($k_3=0,8\dots 0,946$). Встановлений радіус є граничним максимальним значенням даного параметра, за рахунок узгодження динамік зміни потужностей на перемішування біомаси $N_{ЦБ}$ та подолання опору підшипників $N_{ОП}$. Подальше збільшення радіуса реактора недоцільне із

конструкційних і економічних міркувань. Воно не забезпечує знаходження значення коефіцієнту завантаження в межах раціональних параметрів. Значення коефіцієнту завантаження, розраховане для відповідних конструкційних та технологічних параметрів заповнення, забезпечує мінімальну питому потужність n_{II} в межах 99,85-101,23 Вт/м³, що витрачається на обертання біореактора.

2. Коефіцієнт завантаження збільшується від 0,91 (при довжині 1 м) до величини 0,946 (при довжині 8 м). При подальшому збільшенні довжини метантенку не зростає (в межах раціонального діапазону радіусів метантенку $R=0,5-2,15$ м), що пояснюється зменшенням впливу конструкційних характеристик метантенку при збільшенні об'єму, який заповнено біомасою.

3. При граничних значеннях $R=2,15$ м і $k_s=0,946$, умова плавання реактора, буде забезпечуватись при $L>7,5$ м. Причому повне занурення реактора буде при $L=7,5$ м, а при $L>7,5$ м буде спостерігатись часткове занурення біореактора.

4. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що секундні витрати повітря $V_{заг}^c$ в котлі на 1 кВт його потужності складають від $3,53 \cdot 10^{-4}$ до $3,69 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Загальні годинні витрати повітря $V_{заг}^{год}$ від 10,3 (для $P_k=10$ кВт) до 206,3 м³/год ($P_k=200$ кВт).

5. Проведенні дослідження, щодо рівномірності розподілу повітря розподільником в область утворення генераторного газу, дозволяють стверджувати, що витрати повітря $V_{вуг}$ на утворення генераторного газу лежать в межах від 3 до 59,5 м³ на годину. Причому менше значення забезпечує теплову потужність котла P_k 10 кВт, а більше 200 кВт. Опір $\Delta p_{НП}$ розподільника повітря в область утворення генераторного газу є незначним і лежить в діапазоні від 0,9 ($P_k=10$ кВт) до 37,4 Па ($P_k=130$ кВт). Максимальний розмір $d_{HI_{max}}$ отворів розподільника має діапазон від 13 ($P_k=10$ кВт) до 26 мм (P_k від 130 до 200 кВт). Причому, діаметр отворів, для досягнення рівномірності подачі повітря в область утворення генераторного газу, збільшуються від початку розподільника до центру із кроком Δd_{Hi} від 0,3 ($P_k=10, 40$ та 50 кВт) до 0,7 ($P_k=130$ кВт) мм, кількість пар отворів n_H змінюється від 8 ($P_k=10$ кВт) до 40 ($P_k=200$ кВт). Довжина l_H трубчастої секції розподільника варіює в межах від 0,2 ($P_k=10$ кВт) до 0,6 м (P_k від 130 до 200 кВт), а діаметр D_H від 0,03 (P_k від 10 до 70 кВт) до 0,05 м (P_k від 140 кВт до 200 кВт). Отриманні параметри забезпечують рівномірний розподіл повітря в область утворення генераторного газу, що дозволяє максимізувати вихід генераторного газу при експлуатації котлів, які призначені для спалювання біомаси.

6. Проведенні дослідження, щодо повноти подачі повітря розподільником в область спалювання генераторного газу, дозволяють стверджувати, що витрати повітря $V_{сд}$ на спалювання генераторного газу лежать в межах від 10,3 до 206,3 м³ на годину, причому менше значення забезпечує теплову потужність котла P_k 10 кВт, а більше 200 кВт. Причому, опір $\Delta p_{НВ}$ розподільника повітря в область спалювання генераторного газу є незначним, і лежить в діапазоні від 0,06 ($P_k=10$ кВт) до 2,87 Па ($P_k=130$ кВт). Кількість отворів для подачі повітря в область спалювання n_B лежить в межах від 40 ($P_k=10$ кВт) до 800 ($P_k=130$ кВт),

причому, їх діаметр d_{B0} постійний і дорівнює 21 мм. Отриманні параметри забезпечують повне згоряння генераторного газу, що дозволяє максимізувати вихід теплової енергії при експлуатації котлів, які призначені для спалювання біомаси.

7. В результаті теоретичних досліджень отримано параметри котлів, що забезпечують мінімізацію втрат енергії при спалюванні біомаси. Мінімізація втрат відбувається за рахунок розділення робочої області на область утворення генераторного газу та область його спалювання. Витрати біомаси G_b , в таких котлах змінюються в межах від 66,7 ($P_k=10$ кВт) до 1333,3 кг/добу ($P_k=200$ кВт) при кількості завантажень від 2 до 4-х на добу. Висота котла змінюється в межах від 2,05 ($P_k=20$ кВт) до 3,98 м ($P_k=200$ кВт), а діаметр топки котла від 0,48 ($P_k=10$ кВт) до 1,44 м (P_k від 130 до 200 кВт). Причому, загальні витрати повітря $V_{заг}$ в котлі лежать в межах від $3,7 \cdot 10^{-3}$ ($P_k=10$ кВт) до $7,38 \cdot 10^{-2}$ м³/с ($P_k=200$ кВт).

8. Проведенні дослідження дозволяють стверджувати, що при круговому циркуляційному перемішуванні потоку емульсії при температурі у 40⁰ у складі ріпакової олії та метилового спирту у співвідношенні 6:1 (кількість каталізатору КОН 1 %), необхідна ефективність перемішування досягається при створення в струмені емульсії турбулентного режиму. Турбулентний режим у струменні емульсії забезпечується в діапазоні параметрів гідродинамічного розділювача: тиск у форсунці від 0,01 до 0,05 МПа, діаметр сопла форсунок від 10 до 35 мм, кількість форсунок – 4, діаметр посудини розділювача від 0,4 м до 3,2 м, час перемішування до 111 с.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОБІОУСТАНОВОК

3.1. Методика дослідження енергетичних витрат на привід обертових реакторів в біогазових установках

Відповідно до встановлених методик [48, 186, 187, 188], експериментальне визначення впливу технологічних та конструкційних параметрів метантенка та параметрів субстрату на зміну споживання потужності при перемішуванні було проведено із використанням модельного біореактора (внутрішній радіус $R=0,2$ м, робоча довжина $L=0,6$ м), що був виготовлений в Науково-дослідному інституті техніки і технологій НУБіП України.

В якості сировини використовувався субстрат на основі гною ВРХ та свиней. Коефіцієнт виходу газу в біогазових установках $k_{\text{г}}$ ($\text{м}^3/\text{кг}$) можна встановити на основі досліджень [48, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195] та знаючи основні параметри субстратів (таблиця 3.1, 3.2).

Таблиця 3.1

Основні параметри субстрату (середні значення)

Основа субстрату	Щільність ρ_B , $\text{кг}/\text{м}^3$	Щільність сухої речовини ρ_B , $\text{кг}/\text{м}^3$	Вміст сухої маси, $k_{\text{см}}$	Розмір частинки твердої фракції $r_{\text{ср}}$, м	Динамічна в'язкість η_B , Па·с	Температура біомаси t_B , $^{\circ}\text{C}$	Час зброджування $\tau_{\text{зб}}$, діб
Гній ВРХ	1028	1140	0,2	0,01	0,03	37	10
Гній свинячий	1046	1200	0,23	0,01	0,05	37	10
Пташиний послід	1006	1020	0,32	0,01	0,02	37	10
Кукурудзяні залишки (силос)	1027	1100	0,27	0,03	0,03	37	10
Гранули соломи	1032	1100	0,32	0,03	0,04	37	10
Цукровий буряк	1069	1300	0,23	0,05	0,06	37	10
Кормовий буряк	1036	1300	0,12	0,05	0,04	37	10
Бурякова гичка	1024	1150	0,16	0,03	0,03	37	10
Зелені трави (силос)	1038	1100	0,38	0,02	0,04	37	10
Зернова барда	1004	1050	0,07	0,01	0,01	37	10
Картопляна барда	1004	1050	0,07	0,01	0,01	37	10
Плодова барда	1001	1030	0,03	0,01	0,01	37	10
Пресований жом	1048	1200	0,24	0,02	0,05	37	10
Меляса	1043	1050	0,85	0,01	0,05	37	10

Значення коефіцієнту виходу газу в біогазових установках

Основа субстрату	Коефіцієнт вмісту органічної сухої речовини k_{oc}		Коефіцієнт виходу біогазу $k_{вг}$, м ³ /кг		Коефіцієнт виходу СН ₄ $k_{СН4}$, м ³ /кг	
	мін	макс	мін	макс	мін	макс
Гній ВРХ	0,150	0,190	0,0314	0,0570	0,0188	0,0342
Гній свинячий	0,150	0,200	0,0405	0,0900	0,0243	0,0540
Пташиний послід	0,189	0,256	0,0473	0,1152	0,0284	0,0691
Кук. залишки	0,170	0,333	0,0765	0,2328	0,0383	0,1280
Гранули соломи	0,276	0,343	0,1518	0,2332	0,0759	0,1283
Цукровий буряк	0,207	0,219	0,1656	0,1879	0,0878	0,1015
Кормовий буряк	0,075	0,102	0,0465	0,0867	0,0246	0,0468
Бурякова гичка	0,105	0,128	0,0578	0,0768	0,0312	0,0415
Зелені трави	0,175	0,380	0,0963	0,2356	0,0520	0,1272
Зернова барда	0,050	0,070	0,0214	0,0493	0,0124	0,0320
Картопляна барда	0,051	0,067	0,0204	0,0466	0,0118	0,0303
Плодова барда	0,018	0,029	0,0054	0,0185	0,0031	0,0120
Пресований жом	0,198	0,247	0,0495	0,0865	0,0347	0,0648
М'яса	0,680	0,810	0,2448	0,3969	0,1714	0,2977

Знаючи коефіцієнти виходу біогазу та СН₄ можна встановити склад та визначити щільність отриманого біогазу [196].

Щільність метану та вуглекислого газу можна знайти із використанням рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$\rho_{СН4} = \frac{P_p}{518,354T_p}, \rho_{СО2} = \frac{P_p}{188,921T_p}, \quad (3.1)$$

де $\rho_{СН4}$, $\rho_{СО2}$ – щільність метану та вуглекислого газу, відповідно, кг/м³; P_p – тиск в реакторі, Па; T_p – температура в реакторі, К.

Знаючи щільність компонентів біогазу та їх об'ємні співвідношення можна встановити щільність біогазу із субстратів на основі широкого спектру сировини (таблиця 3.3).

Виходячи із основних параметрів субстрату (таблиця 3.1) та біогазу (таблиця 3.2) згідно аналітичним моделюванням роботи обертового метантенка можна встановити його параметри, що забезпечують мінімізацію енерговитрат при перемішуванні біомаси та необхідну продуктивність за біогазом.

Враховуючи коефіцієнт корисної дії $\eta_{дв}$ електродвигуна та приводу $\eta_{пр}$, що обертає метантенк, а також частку активної потужності $\cos\varphi$, потужність $N_{дв}$, що споживається приводним двигуном:

$$N_{дв} = \frac{N_{кр}}{\eta_{дв}\eta_{пр}\cos\varphi}, \quad (3.2)$$

де $N_{кр}$ – потужність на обертання метантенка, що встановлено теоретично, Вт.

Розрахункові значення щільності біогазу

Основа субстрату	Вихід CH_4 , $\text{м}_3/\text{кг}$		Вміст CO_2 , $\text{м}_3/\text{кг}$		Щільність біогазу в біореакторі, $\text{кг}/\text{м}^3$		Щільність біогазу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$	
	мін	макс	мін	макс	макс	мін	макс	мін
Гній ВРХ	0,0182	0,0342	0,0132	0,0228	1,251	1,226	1,236	1,211
Гній свинячий	0,0235	0,0540	0,0170	0,0360	1,251	1,226	1,236	1,211
Пташиний послід	0,0269	0,0691	0,0203	0,0461	1,263	1,226	1,248	1,211
Кук. залишки	0,0383	0,1280	0,0383	0,1047	1,352	1,289	1,335	1,273
Гранули соломи	0,0759	0,1283	0,0759	0,1050	1,352	1,289	1,335	1,273
Цукровий буряк	0,0878	0,1015	0,0778	0,0864	1,314	1,301	1,298	1,286
Кормовий буряк	0,0246	0,0468	0,0219	0,0399	1,314	1,301	1,298	1,286
Бурякова гичка	0,0306	0,0415	0,0271	0,0353	1,314	1,301	1,298	1,286
Зелені трави	0,0510	0,1272	0,0452	0,1084	1,314	1,301	1,298	1,286
Зернова барда	0,0124	0,0320	0,0090	0,0172	1,251	1,163	1,236	1,149
Картопляна барда	0,0118	0,0303	0,0086	0,0163	1,251	1,163	1,236	1,149
Плодова барда	0,0031	0,0120	0,0023	0,0065	1,251	1,163	1,236	1,149
Пресований жом	0,0347	0,0648	0,0149	0,0216	1,100	1,037	1,087	1,024
Меяса	0,1714	0,2977	0,0734	0,0992	1,100	1,037	1,087	1,024

Дослідження енергетичної ефективності перемішування субстрату проводились на спеціально сконструйованій дослідній установці (рис. 3.1 та 3.2).

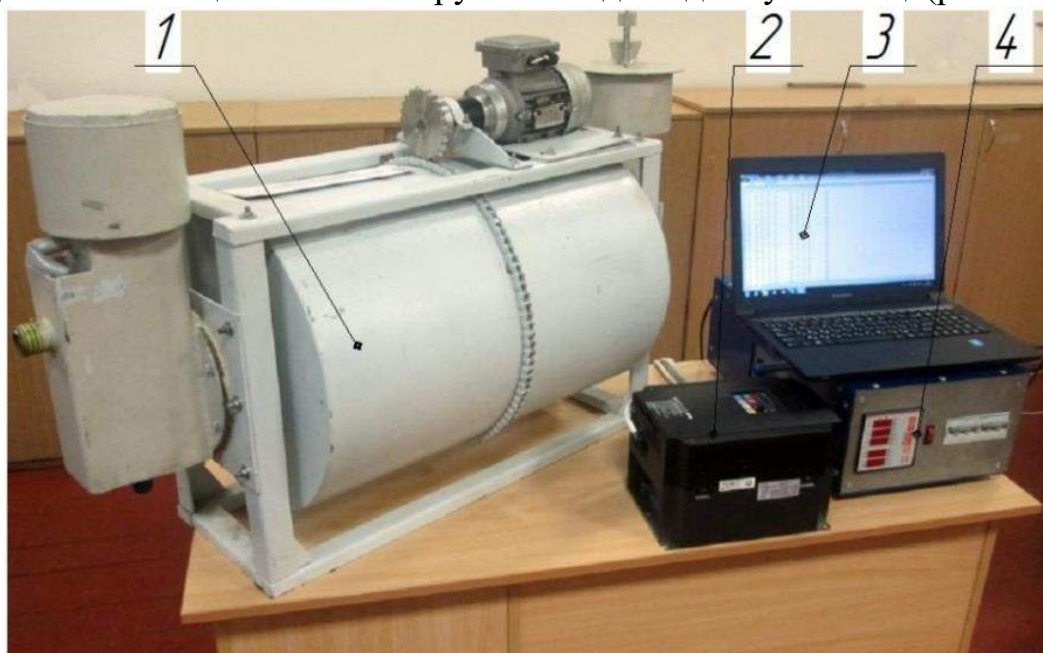


Рис. 3.1. Комплект обладнання для проведення для дослідження енергетичної ефективності перемішування субстрату (зовнішній корпус не показано):

1 – обертовий метантенк, 2 – частотний перетворювач, 3 – реєстратор, 4 – цифровий вимірювальний пристрій.

Дослідна установка складається із обертового метантенка БОР-0,4, зовнішнього корпусу, керуючої, вимірювальної та фіксуєчої апаратури – частотного перетворювача Hitachi-3G3JX-A4075-EF [197], цифрового вимірювача DMK-30 та реєструючого пристрою на базі ноутбука.



Рис. 3.2. Обертовий метантенк встановлено у зовнішній корпус

При проведенні досліджень метантенк встановлювався в зовнішній корпус, заповнювався субстратом у відповідності із встановленим діапазоном значень коефіцієнту заповнення k_z від 0,8 до 1. Зовнішній корпус заповнювався водою на рівень, що відповідав встановленому діапазону коефіцієнту занурення k_{zn} від 0,8 до 1. Частота обертання приводного двигуна регулювалась за допомогою частотного перетворювача Hitachi 3G3JX A4075 EF, що дозволило отримати діапазон кутових швидкостей метантенка від 0,05 до 0,5 рад/с. Потужність споживана приводним двигуном визначалась за допомогою цифрового вимірювача DMK 30 та фіксувалась за допомогою спеціального програмного забезпечення на реєструючому пристрої (ноутбук на базі процесора Intel Core I5).

3.2. Методика дослідження енергетичної ефективності спалювання соломи в котлах із верхнім горінням

Для проведення досліджень щодо впливу параметрів котлів із верхнім горінням на енергетичну ефективність спалювання соломи зернових, було використано розроблений котел КГВ-20 (рис. 3.3), який обладнаний електронною системою керування на базі мікропроцесорного пристрою АТОС. Для подачі повітря в топку котла було використано систему подачі повітря на базі вентилятора WPA-06, обладнану асинхронним двигуном потужністю 83 Вт. Для оцінки теплової потужності котла, його було обладнано системою подачі повітря в нагрівальну порожнину на базі вентилятора OBR-200M-2K, що оснащений електродвигуном потужністю 600 Вт.

Топка котла завантажувалась січкою соломи пшениці різного фракційного складу з середньою довжиною 30 мм.

При проведенні досліджень змінювалась подача повітря в топку котла від 0,0015 до 0,04 м³/с.

Витрата повітря котлом та його температура визначалась за допомогою анемометр-термометра СЕМ ДТ 620 (рис 3.4, а). Склад димових газів визначався за допомогою газоаналізатора ОКСІ 5М (рис. 3.4, б).

Викид СО оцінювався згідно методики вмісту забруднюючих речовин у димових газах котлів [198] за питомим вмістом СО у викидах котла та за специфічним показником емісії:

$$k_{CO} = \frac{c_{CO} v_{O_2}}{Q_n^{CO}} \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \leq 7,9 \frac{\text{г}}{\text{ГДж}}, \quad (3.3)$$

де k_{CO} – показник емісії СО, г/ГДж; c_{CO} – виміряна масова концентрація СО в сухих димових газах, приведена до нормальних умов та стандартного вмісту кисню, г/м³; v_{O_2} – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до нормальних умов та стандартного вмісту кисню, м³/кг; Q_n^{CO} – нижча робоча теплота згоряння СО, МДж/кг; q_4 – втрати тепла через недопал палива, %.



Рис. 3.3. Дослідна установка для встановлення енергетичної ефективності спалювання соломи зернових у котлах із верхнім горінням:

1 – котел КГВ 20, 2 – система подачі повітря в топку котла, 3 – система подачі повітря в нагрівальну порожнину котла, 4 – електронна система керування.



а



б

Рис. 3.4. Вимірювальна апаратура:

а – анемометр-термометр SEM DT 620, б – газоаналізатор OKCI 5M.



а



б

Рис. 3.5. Визначення дійсної теплової потужності котла:

а – визначення витрат нагрітого повітря, б – визначення температури нагрітого повітря.

Дійсна теплова потужність котла визначалась згідно [199] за формулою:

$$P_k^d = c_{пов} v_{пов} (t_{ex} - t_{вих}), \quad (3.4)$$

де P_k^d – дійсна теплова потужність котла, Вт; $c_{пов}$ – теплоємність повітря, Дж/(кг К); $v_{пов}$ – питомий об'єм повітря, що нагрівається, м³/с;

t_{ex} – температура повітря на вході в нагрівну порожнину котла, °С;

$t_{вих}$ – температура повітря на виході із нагрівної порожнини котла, °С.

3.3. Методика дослідження енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива в циркуляційних змішувачах

Для проведення досліджень енергетичної ефективності циркуляційних змішувачів було розроблено експериментальну установку (рис. 3.5). До її складу ввійшли: циркуляційний реактор для естерифікації рослинної олії ЦРПР-2, гідростанція, керуюча, вимірювальна та фіксуєча апаратура (частотний перетворювач Hitachi-3G3JX-A4075-EF, цифровий вимірювач DMK-30, що аналізує параметри споживання електроенергії, тахометр УТ-372, ноутбук).

Для проведення випробувань використовувались ріпакова олія, яка в кількості 150 л закачувалась за допомогою гідростанції до циркуляційного-змішувача для естерифікації.

Гідростанція (рис. 3.6) складалася із шестеренчастого насоса НШ-100, спеціально розробленої запобіжної муфти, асинхронного електродвигуна потужністю 5 кВт та номінальною частотою обертання 1500 об/хв і системи трубопроводів, оснащених спеціальними лічильниками.

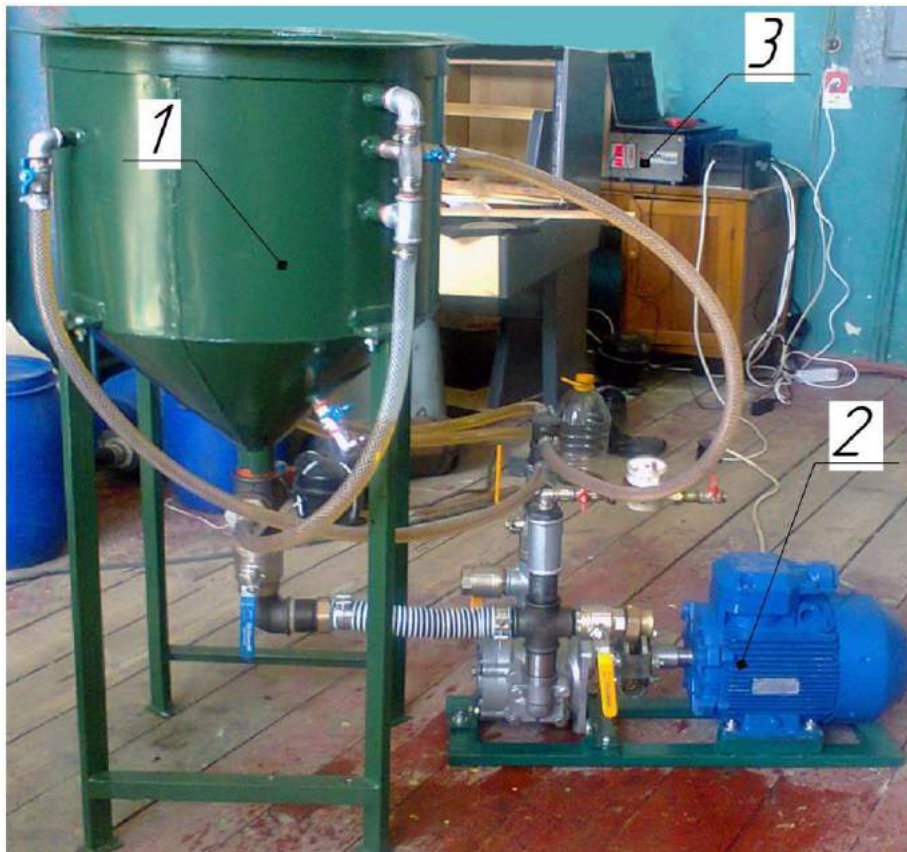


Рис. 3.5. Комплект обладнання для дослідної перевірки енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива в циркуляційних змішувачах: 1 – циркулярний змішувач, 2 – гідростанція, 3 – блок апаратури.



Рис. 3.6. Гідростанція: 1- електродвигун, 2 – гідравлічний насос, 3 – система трубопроводів, 4 – запобіжна муфта.

Під час процесу роботи циркуляційного змішувача гідростанція забезпечувала подачу олії у форсунки, що створювали турбулентні струмені емульсії, які і забезпечували необхідне перемішування та циркуляцію.

Під час проведення випробувань змінювалися: діаметр форсунок d_f , кут встановлення форсунок β_f , частота обертів гідронасоса n_n (таблиця 3.4) та фіксувалась потужність W_d споживана електродвигуном в процесі перемішування і циркуляції емульсії.

Таблиця 3.4

Інтервали значень та рівні варіювання досліджуваних факторів

Найменування фактора та його позначення	Рівні факторів			Інтервали варіювання
	-1	0	+1	
Оберти насоса n_n , об/хв	200	800	1400	600
Кут нахилу форсунок β_f , град	0	45	90	45
Вихідний діаметр форсунки d_f , мм	9	13	17	4

Частота обертів електродвигуна змінювалась за допомогою частотного перетворювача Hitachi-3G3JX-A4075-EF (рис. 3.7, а) та фіксувалась тахометром УТ-372 (рис. 3.7, б). Споживана потужність W_d фіксувалась за допомогою цифрового вимірювача ДМК 30 та ноутбука, із встановленим відповідним програмним забезпеченням (рис. 3.7, а).

Експериментальні дослідження енергетичної ефективності циркуляційних змішувачів розділювачів було проведено згідно матриці планування трьох-факторного експерименту за планом Бокса-Бенкіна (таблиця 3.5).



а



б

Рис. 3.7. Керуюча, вимірювальна та фіксуєча апаратура:

1 – частотний перетворювач, 2 – цифровий вимірювач для реєстрації параметрів споживання електроенергії, 3 – ноутбук із встановленим спеціальним програмним забезпеченням, 4 – тахометр.

Таблиця 3.5

Матриця планування трьох-факторного експерименту за планом Бокса-Бенкіна

№ п/п досліджу	Назва досліджуваних факторів					
	Оберти насоса, об/хв		Кут нахилу форсунок, град		Вихідний діаметр форсунки, мм	
	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1400	1	90	0	13
2	-1	200	-1	0	0	13
3	1	1400	-1	0	0	13
4	-1	200	1	90	0	13
5	1	1400	0	45	1	17
6	-1	200	0	45	-1	9
7	1	1400	0	45	-1	9
8	-1	200	0	45	1	17
9	0	800	1	90	1	17
10	0	800	-1	0	-1	9
11	0	800	1	90	-1	9
12	0	800	-1	0	1	17
13	0	800	0	45	0	13
14	0	800	0	45	0	13
15	0	800	0	45	0	13

Дослідження, щодо якості отриманого дизельного біопалива, проводились згідно відповідних методик та нормативного забезпечення [200, 201, 202, 203, 204, 205, 206].

Якість виробленого дизельного біопалива оцінювалась на відповідність діючому ДСТУ 6081 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги». При цьому визначалися фізичні показники якості згідно із чинною нормативною документацією: густина за температури 15⁰С ареометром згідно із ГОСТ 3900; кінематична в'язкість за температури 40⁰С віскозиметром капілярним – ДСТУ ГОСТ 33; температура спалаху у закритому тиглі – ГОСТ 6356.

Випробування якості дизельного біопалива проводилися у лабораторії дизельного біопалива НУБіП України із застосуванням наступного обладнання:

- для визначення густини – ареометр АН 860 890 з ціною поділки 0,5 кг/м³, циліндр мірний на скляній основі 1000 мл, термометр ртутний;
- для визначення в'язкості дизельного біопалива (рис. 3.8) – віскозиметр капілярний скляний ВПЖ 4 з розміром капіляра 0,42 мм, секундомір “Агат”, термостат рідинний ТМ 100, термометр ртутний;
- температура спалаху дизельного біопалива у закритому тиглі на напівавтоматичному приладі ТВЗ ЛАБ 01 (рис. 3.9).

Густина $\rho_{(15)}$ дизельного біопалива при 15⁰С визначалась за рівнянням (3.5) відповідно до нормативу ЄС EN 14214, використовуючи густину $\rho_{(T)}$ визначену ареометром при відомій температурі T , що знаходилась у діапазоні від 20⁰С до 60⁰С:

$$\rho_{(15)} = \rho_{(T)} + 0,723(T - 15). \quad (3.5)$$

Одержане на експериментальній установці дизельне біопаливо за показниками якості: кінематична в'язкість, густина та температура спалаху у закритому тиглі повинні відповідати чинному ДСТУ 6081:2009 Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ ІЗ СИРОВИНИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ЕЛЕМЕНТІВ АГРОЕКОСИСТЕМИ У ВИРОБНИЦТВІ

4.1. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва біогазу в обертових реакторах та результати їх перевірки у виробництві

Виходячи із обсягів виробництва біогазу можна встановити основні техніко-технологічні параметри як біогазового реактора, зокрема так і всього процесу виробництва біогазу загалом.

За технологічну основу приймемо процес метаногенезу біосировини з добовим об'ємом до 300 м³, температурним режимом 38-55 °С. Біосировинна повинна мати кислотність 6,5-7 од., вологість 90-95%, фракційний склад з максимальним розміром твердих складових до 30 мм, допустиме відхилення температури в анаеробному реакторі в межах ±2 °С. Доза добового завантаження 10 %, яке здійснюється кожні 2 год та експозиції анаеробного зброджування від 10 до 20 діб у залежності від вибраного температурного режиму зброджування.

Процес утворення біогазу (суміш метану CH₄ ~ 70 %, сірководню H₂S ~ 2,0 %, парів води H₂O ~ 8 %, вуглекислого газу CO₂ ~ 15% та інших домішок) проходить при забезпеченні герметичності та тиску в робочому об'ємі метанового реактора при періодичному перемішуванні реагуючого субстрату та стабілізації температури на заданому рівні [48, 189, 190].

Досвід роботи з обладнанням біогазових установок вітчизняного та зарубіжного виробництва дозволяє оптимізувати конструкторсько-технологічну схему модульної біогазової установки на основі закладених розрахункових параметрів системи підготовки біосировини на стадії її очистки, подрібнення з виходом на запропоновану в технологічному процесі вологість. Даний етап технологічного процесу (рис. 4.1) забезпечується використанням вібраційних решіт та іншого обладнання: для перемішування - механічні лопатеві мішалки, лопатеві насоси типу НУІ-Ф-100, для подрібнення і перекачування - ріжучі дробарки, насоси-подрібнювачі типу СД-50.

Витрати електроенергії на етапі низькотемпературної підготовки сировини складаються із витрат на подачу біосировини до пристрою розділення біомаси, на роботу розділювача, подрібнювача та на перекачку підготовленої біосировини до підігрівача-витримувача.

При проведенні аеробного етапу підготовки сировини, для нагріву біосировини до температури 38-55 °С та забезпечення заданої кислотності, в складі технологічного обладнання аеробної стадії біопроектного процесу використовується підігрівач-витримувач, теплоносієм в якому є вода з температурою 75-80 °С. Циркуляція біомаси при теплообміні, вивантаження та інокуляція підготовленої

до анаеробного зброджування біомаси забезпечується фекальним центробіжним насосом, який подає готовий субстрат дозовано до метанового реактора через задані інтервали часу.

Для аеробної підготовки біосировини використовується підігрівач витримувач. Оптимальним в енергетичному плані та прийнятим до розрахунків при розробці конструкторської документації в пропонованому процесі виробництва біогазу є мезофільний режим (38 - 40°C). Підігрів біосировини в аеробному біореакторі (підігрівачі-витримувачі) проводиться шляхом теплообміну між теплоносієм (вода +70°C) і акцептором тепла – субстратом з температурним діапазоном від +5°C до +25°C. Крім теплообміну, в підігрівачі-витримувачі проводиться процес утворення органічних кислот з доведенням рН до 6,9-7,0. Цей процес вимагає періодичного перемішування шарів біомаси і проходить упродовж 1,0-1,5 доби. Підготовлена біосировина перекачується до інокуляційної камери з визначеною періодичністю і дозою.

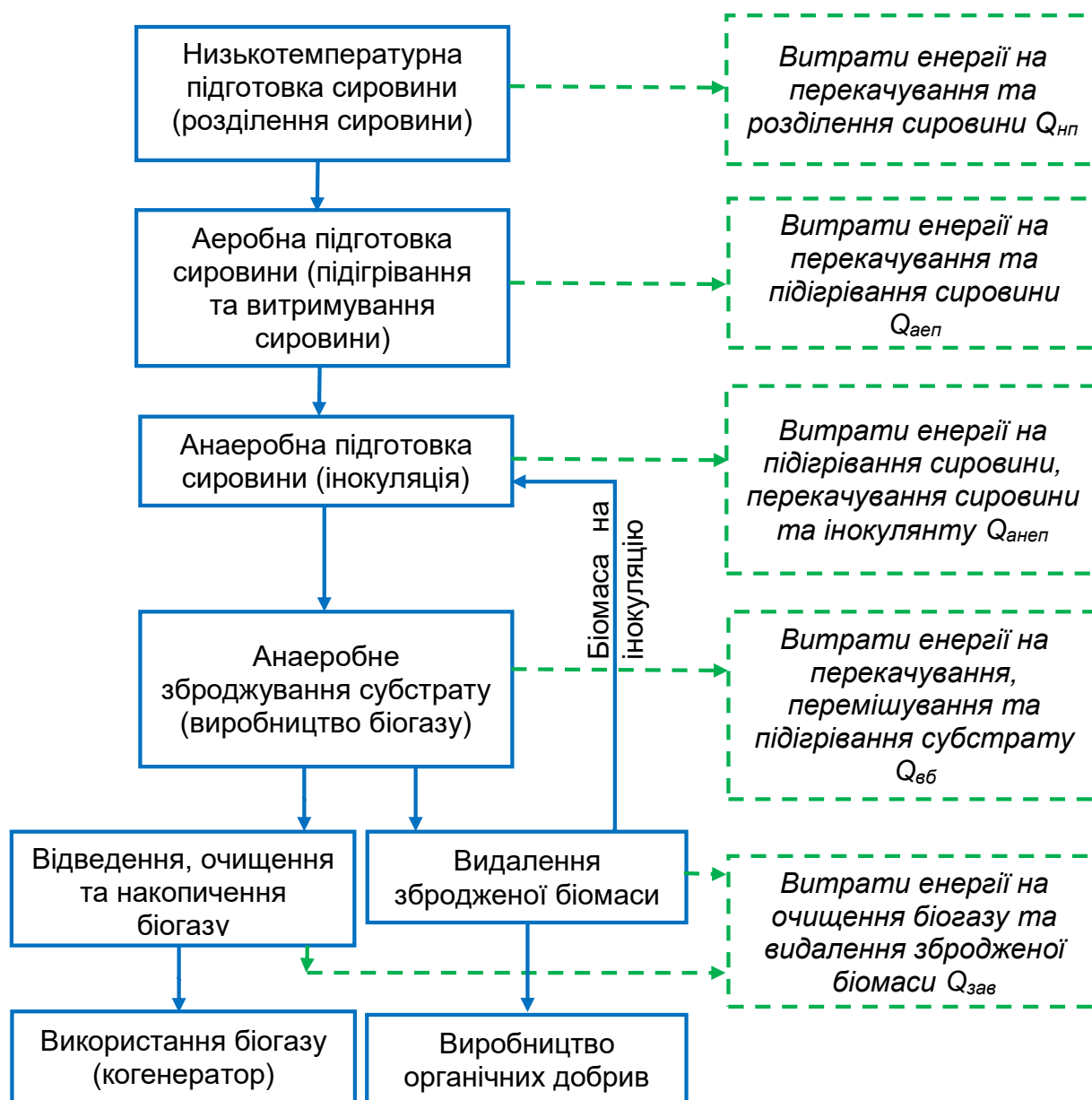


Рис. 4.1. Блок-схема технологічних етапів отримання біогазу

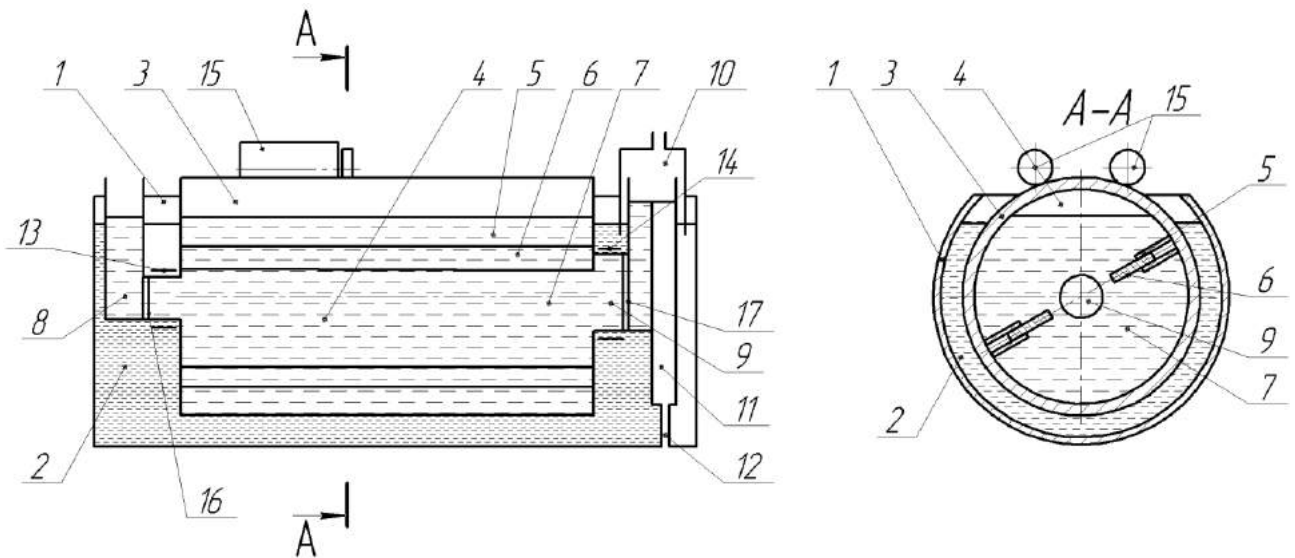
В інокуляційній камері біомаса змішується з метаноутворюючими мікроорганізмами, які надходять до камери з обертового біореактора. В цій камері проходить перша стадія метаногенезу з активним виділенням CO_2 , концентрація якого в суміші утворених газів становить більше 50%. Ці гази, будучи низькокалорійною гарячою сумішшю, відводяться і утилізуються шляхом спалювання окремо від основного газового палива. Отриманий в результаті змішування біосировини та інокулянта субстрат дозовано через шланг подається до основної камери – анаеробного біореактора, де проходять процеси метаноутворювання.

У відповідності до запропонованої технологічної схеми модульної біогазової установки розглядаються принципово нові технічні рішення в системі перемішування реагуючого субстрату в метановому реакторі. Вони полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, що впливають на переміщення органічної і мінеральної фракцій біомаси, які заповнюють внутрішній корпус. Корпус біореактора виконано у вигляді горизонтального циліндра з діаметрально розміщеною перегородкою, який обертається навколо горизонтальної осі, опираючись на протилежно розміщені осьові цапфи. Біореактор заповнюється інокуюваною біомасою та обертається в рідині, яка знаходиться в зовнішньому корпусі. Така конструкція створює підймальну силу для обертового біореактора, розвантажуючи опорні цапфи, що зменшує сили тертя в них і відповідно зменшує енергію, яка витрачається на обертання і перемішування завантаженої біомасою конструкції. Дана конструкція біореактора (рис. 4.2) забезпечує перемішування реагуючого субстрату по всьому його об'ємі і ліквідує можливість створення плаваючої органічної частини та зануреного мінерального осаду.

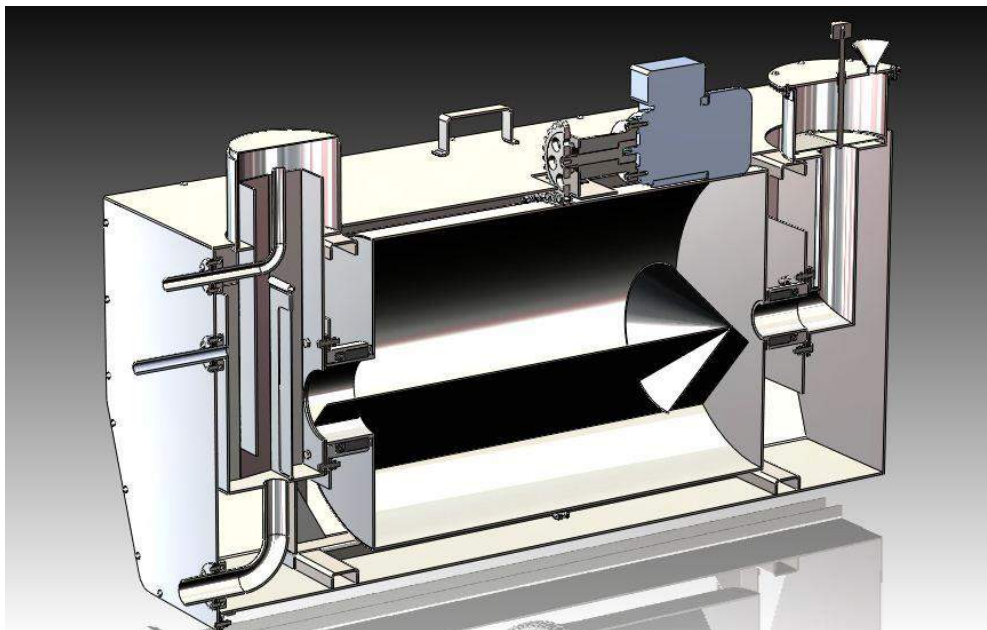
Біогаз видаляється з біореактора за рахунок занурення газового об'єму в реагуючий субстрат при повороті біореактора на 180° та виходу біогазу в сторону пониженого тиску, який створюється в гідравлічному затворі під газовим ковпаком. Біогаз стабілізується по тиску величиною ваги і горизонтальною площею газового ковпака. В подальшому біогаз (CH_4 – 72 %, CO_2 – 25 % та інші) проходить очистку від CO_2 і H_2S та зберігається в газгольдерах. Стабілізований по тиску і хімічному складу біогаз іде на використання когенераційною установкою, що входить до комплексу обладнання установки.

Зброджена біомаса видаляється з біореактора через гідрозатвор і направляється в місце її накопичення. Третина об'єму маси, що одноразово вивантажується з біореактора гвинтовим насосом, направляється на інокуляцію свіжої біомаси.

Термостабілізація біомаси в анаеробному біореакторі досягається за рахунок температури води ($+42^\circ\text{C}$), в яку занурено обертовий корпус реактора. Нерухомий циліндричний корпус, який заповнений теплою водою, має трубчаті нагрівальні елементи, теплоносієм в яких є вода ($+75^\circ\text{C}$). Корпус біогазової установки має зовнішню термоізоляцію.



а



б

Рис. 4.2. Установа біогазова модульного типу, а – схема, б – модель:

1 – горизонтальний зовнішній корпус; 2 – рідина; 3 – циліндричний реактор; 4 – камера зброджування; 5 – перегородка; 6 – рухомі пластини; 7 – органічна маса; 8, 9, 12 – патрубки; 10 – газозбірник; 11 – вивантажувальна камера; 13, 14 – підшипникові вузли; 15 – зовнішній привід; 16, 17 – блокувальні ущільнення

Потенціал виробництва біогазу, при використанні рослинної біомаси та використанні гною та посліду, можна визначати за наступною залежністю:

$$B = B_P + B_T = k_{БР} k_{BP} \sum_{i=1}^n S_i 100 Y_i (k_{Bi} - k_{zi}) + k_{БТ} k_{BT} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_{Ej} + m_{Bj}) k_{Гj}, \quad (4.1)$$

де B – потенціал виробництва біогазу при зброджуванні рослинної біомаси та гноївки, м^3 ; B_P – вихід біогазу при зброджуванні рослинної біомаси, м^3 ; B_T – вихід біогазу при зброджуванні гноївки, м^3 ; $k_{БР}$, $k_{БТ}$ – питомий вихід біогазу при анаеробному зброджуванні відповідно рослинної біомаси та гноївки, $\text{м}^3/\text{кг}$; k_{BP} ,

k_{BT} – коефіцієнт використання відповідно рослинної біомаси та гноївки в біогазових установках, відн. од.; n – кількість культур в сівозміні, які використовуються для виробництва рослинної біомаси; S_i – площа вирощування i -ї культури, га; V_i – урожайність i -ї культури, ц/га; k_{Bi} – коефіцієнт виходу біомаси i -ї культури, відн. од.; k_{3i} – коефіцієнт втрат біомаси i -ї культури під час збирання, відн. од.; m – кількість груп тварин та птиці; N_j – поголів'я тварин та птиці j -го виду, гол.; T_j – стійловий період поголів'я тварин та птиці j -го виду, діб; m_{Ej} – маса екскрементів j -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу; m_{Bj} – маса води, що надходить в екскременти j -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу; $k_{ГГ}$ – коефіцієнт виходу гноївки придатної для рідкофазного зброджування, відн. од.

Коефіцієнти використання рослинної біомаси та гноївки в біогазових установках, виходу біомаси i -ї культури та її втрат під час збирання, виходу гноївки придатної для рідкофазного зброджування, а також кількість культур в сівозміні, які використовуються для виробництва рослинної біомаси, площа вирощування та урожайність i -ї культури, кількість груп тварин та птиці, поголів'я та стійловий період тварин та птиці j -го виду, маса екскрементів та маса води, що надходить в екскременти j -го виду тварин та птиці встановлюються для кожного сільськогосподарського підприємства на основі конкретних моделей функціонування агроєкосистем.

Слід зазначити, що при загальному дефіциті гумусу більше ніж 67 кг/га, використання рослинної біомаси на потреби виробництва біогазу неможливе, через недотримання умови позитивного балансу гумусу. Граничний обсяг рослинної біомаси, яку можна використовувати на потреби виробництва біогазу, за нульового балансу гумусу, становить близько 40 %.

При рекомендованих параметрах біомаси, біогазу та обраних конструкційних параметрах біореактора [48], можна оцінити вплив коефіцієнту заповнення на витрати енергії та визначити його оптимальне значення.

Так, прийнявши діапазон робочих (внутрішніх) радіусів R метантенка від 0,5 до 3,5 м, отримано залежності потужності для забезпечення обертання реактора N_{KR} від коефіцієнта заповнення k_3 в межах від 0,8 до 1 при повному зануренні метантенка, прийнявши геометричні та кінематичні параметри реактора виходячи із раціональних міркувань та попередніх розрахунків (розділ 2.1 та 2.2).

Знайдено емпіричні рівняння (рис. 4.3) залежності потужності на обертання метантенка від його внутрішнього радіуса та коефіцієнта заповнення, кВт:

$$n_{П} = 10169 - 20245k_3 - 956R + 10884k_3^2 + 270Rk_3 + 169R^2. \quad (4.2)$$

Із рівняння (4.2) походить, що коефіцієнт заповнення збільшується по мірі збільшення внутрішнього радіуса реактора від 0,5 до 2,15 м в діапазоні від 0,89 до 0,946. Причому, встановлено раціональний радіус метантенка ($R=2,15$ м), що забезпечує мінімальні енерговитрати ($N=6912$ Вт) на обертання метантенка в широкому діапазоні коефіцієнта завантаження ($k_3=0,8 - 0,946$) є граничним максимальним значення даного параметра, за рахунок узгодження динамік зміни потужностей на перемішування біомаси $N_{ЦБ}$ та подолання опору підшипників $N_{ОП}$ (рис. 4.4).

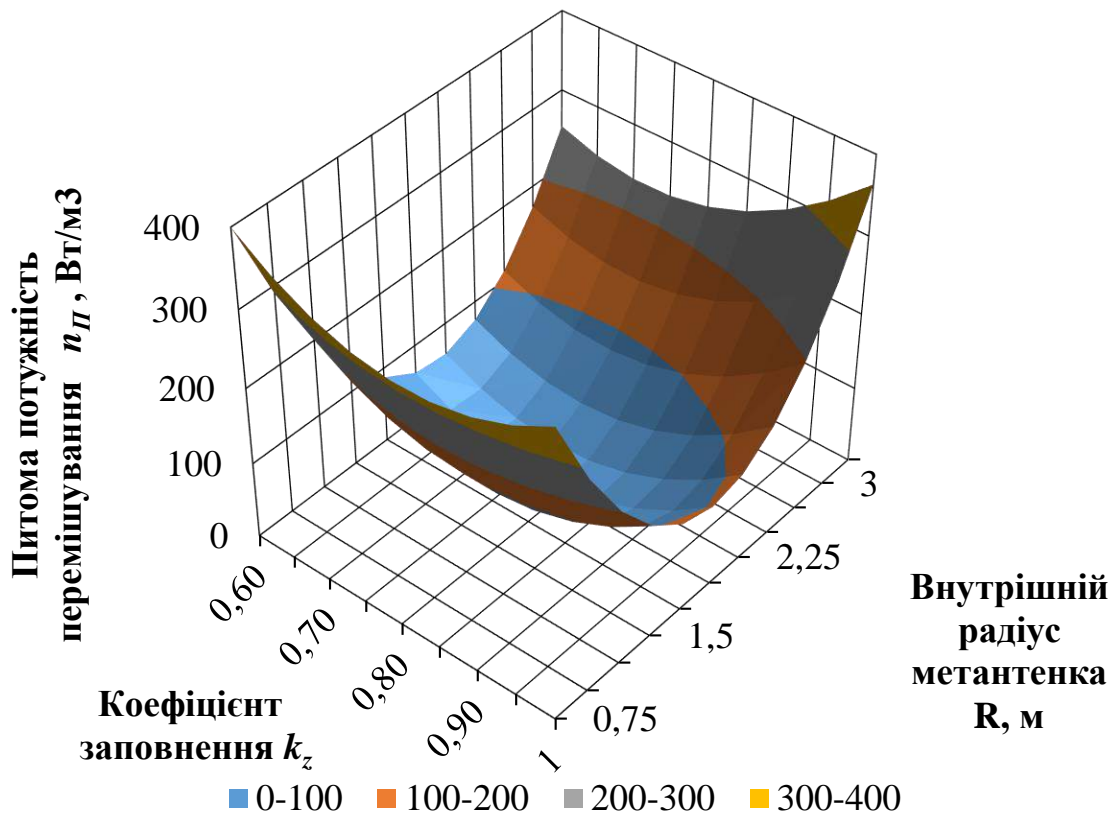


Рис. 4.3. Залежність питомої потужності n_D перемішування біомаси в реакторі від коефіцієнта заповнення k_z та внутрішнього радіуса R (коефіцієнт занурення $k_{zn}=1$, кутова швидкість $\omega=0,035$ рад/с)

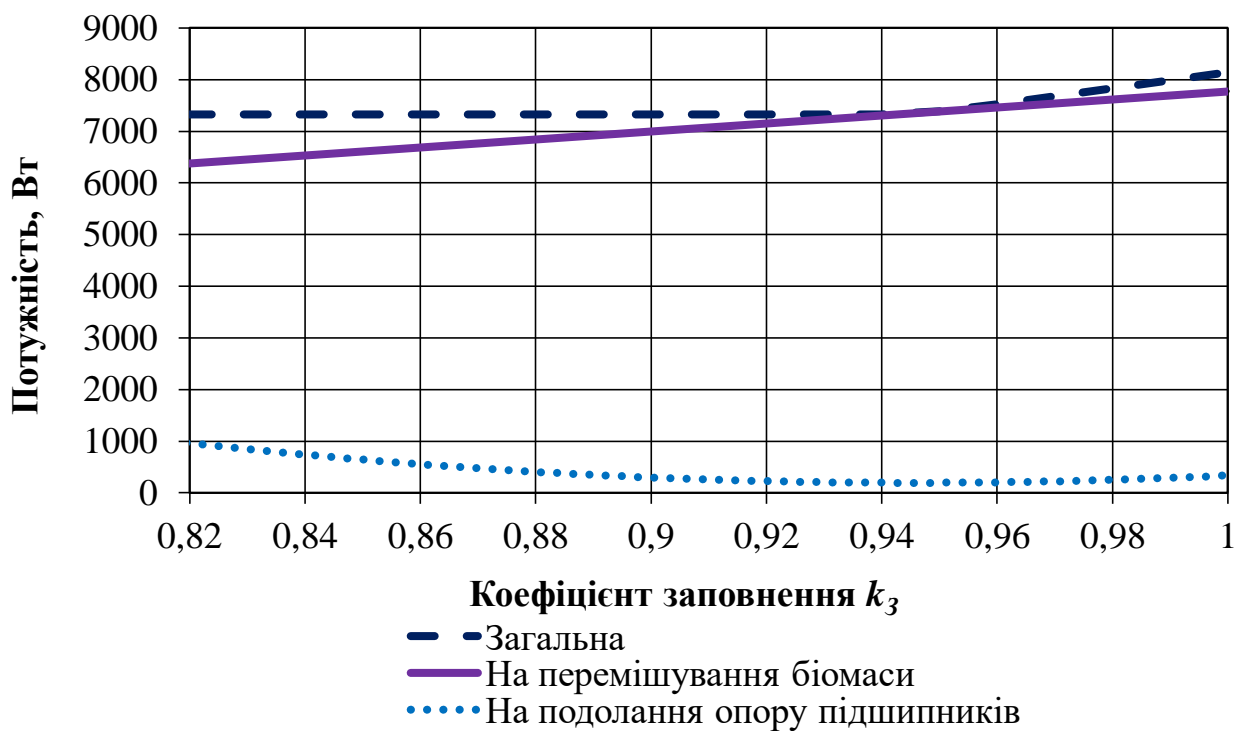


Рис.4.4. Залежність потужності для забезпечення обертання біореактора від коефіцієнта заповнення (внутрішній радіус $R=2,15$ м, робоча довжина $L=5$ м)

Подальше збільшення радіуса реактора недоцільне із конструкційних і економічних міркувань та не забезпечує отримання оптимального значення коефіцієнта заповнення.

Розрахунки показують, що оптимальне значення коефіцієнта заповнення забезпечує мінімальну питому потужність N_{II} , що витрачається на обертання біореактора (рис. 4.5).

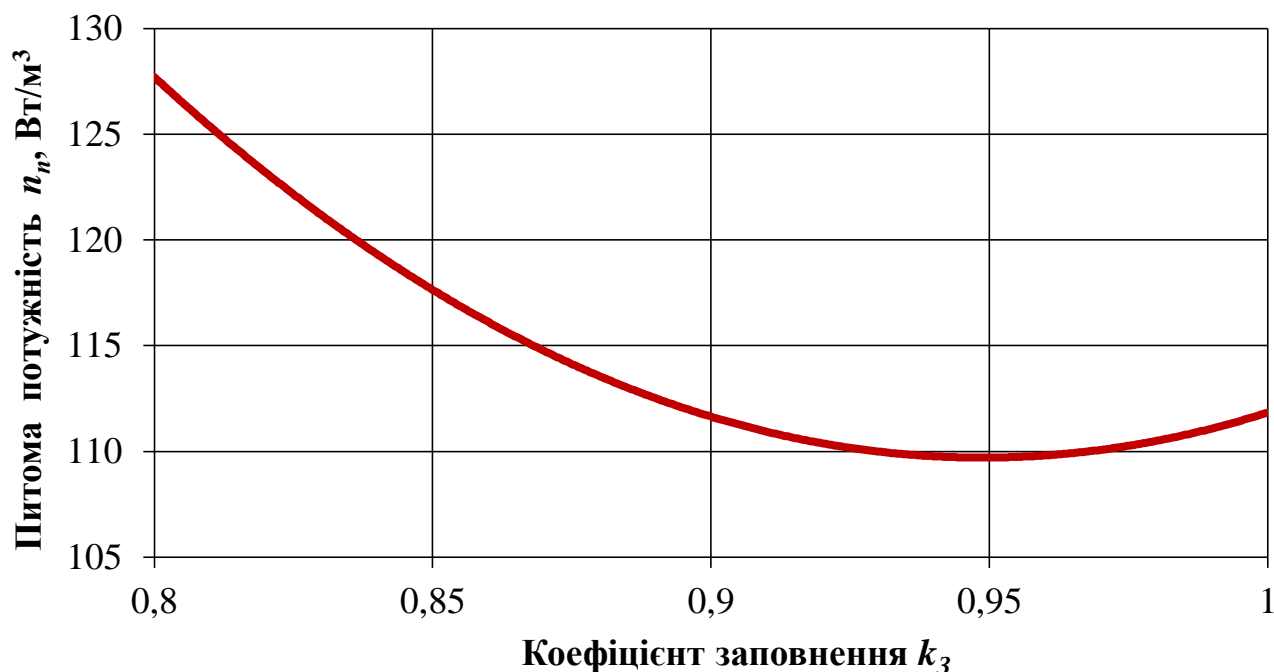


Рис. 4.5. Залежність питомої потужності на обертання метантенка від коефіцієнта його заповнення біомасою

Також проведено дослідження, що дозволили встановити залежність між робочою довжиною метантенка та коефіцієнтом заповнення:

$$k_3 = 0,9147 + 0,036 \lg L. \quad (4.3)$$

Проведенні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що коефіцієнт заповнення збільшується від 0,91 при довжині 1 м, до величини 0,946 при довжині 8 м. При подальшому збільшенні довжини метантенку коефіцієнт заповнення не збільшується (в межах раціонального діапазону радіусів метантенку $R=0,5 \dots 2,15$ м), що пояснюється зменшення впливу конструкційних характеристик метантенку при збільшенні об'єму, який заповнено біомасою.

Так, при граничних значеннях $R=2,15$ м і $k_3=0,946$, умова плавання реактора буде забезпечуватись при $L > 7,5$ м. Причому повне занурення реактора буде при $L=7,5$ м, а при $L > 7,5$ м буде спостерігатись часткове занурення біореактора.

Встановлено параметри біореактора (таблиця 4.1) при оптимальному коефіцієнті заповнення, що забезпечують плавання біореактора в рідині, якою заповнено зовнішній корпус.

Таблиця 4.1

Рациональні конструкційні параметри обортових біореакторів

Робочий діаметр реактора, D , м	Товщина стінок реактора, s , м	Діаметр зовнішнього корпусу D_3 , м	Робоча довжина L , м	Вага реактора m_p , кг	Коефіцієнт заповнення біомасою k_3	Об'єм завантаженої біомаси (максимальний) V_B , м ³	Потужність на обертання $N_{кр}$, Вт
1	0,003	1,2	4	200	0,94	3,0	299
2	0,005	2,4	4	424	0,94	11,8	1197
3	0,005	3,6	4	895	0,94	26,6	2661
4	0,005	4,8	6	1979	0,95	71,3	7114
4,3	0,005	5,2	7,5	2797	0,95	103,0	10408

Використання параметрів наведених в таблиці 4.1 дозволяє проектувати обортові біореактори із мінімальними питомими енерговитратами на перемішування біомаси.

У результаті проведеного аналізу можна стверджувати, що заповнений на 94-95 % обортовий реактор з об'ємом завантаження біомаси V_B від 3 м³ до 103 м³ (робочий діаметр лежить в діапазоні $D=1-4,3$ м) потребує мінімальної потужності для приводу $N_{кр}$ від 299 Вт до 10,4 кВт при його зануренні у рідину на величину від 95 до 97 %. При цьому, питома потужність приводного механізму в розрахунку на об'єм біомаси в реакторі лежатиме в межах 99,85...101,23 Вт/м³.

Відповідно до встановлених методик [48], експериментальне визначення впливу технологічних та конструкційних параметрів метантенка і параметрів субстрату на зміну споживання потужності при перемішуванні субстрату було проведено із використанням модельного біореактора (внутрішній радіус $R=0,2$ м, робоча довжина $L=0,6$ м), який був виготовлений в Науково-дослідному інституті техніки і технологій НУБіП України (рис. 4.6).

В якості сировини використовувався субстрат на основі гною ВРХ та свиней, основні параметри якого наведено в таблицях 3.1-3.3.

Проведені дослідження впливу коефіцієнта заповнення k_3 на потужність $N_{об}$, що споживається приводним двигуном дозволили, за допомогою регресивного аналізу результатів, отримати коефіцієнти відповідної емпіричної залежності (з рівнем довірчої імовірності (коефіцієнтом детермінації) – $R^2=0,9664$):

$$N_{об} = 2179,2k_3^3 - 5538,5k_3^2 + 4649,5k_3 - 1278,1, \quad (4.4)$$

де $N_{\text{дв}}$ – середня потужність двигуна на обертання метантенка, встановлена в результаті практичних досліджень, Вт; k_3 – коефіцієнт заповнення метантенка субстратом (біомасою).



Рис. 4.6. Біогазовий реактор БОР-0,4 (зовнішній корпус знято)

Визначенні коефіцієнти регресії рівняння (4.4) дозволяють отримати графічну залежність (рис. 4.7).

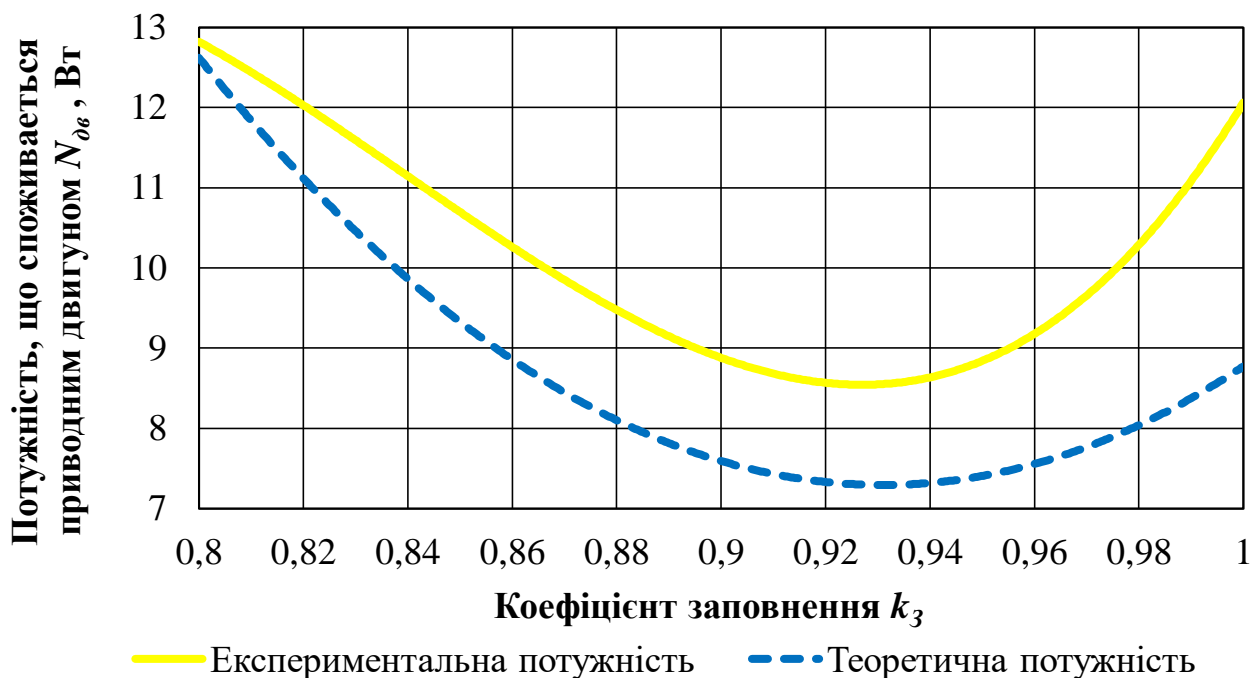


Рис. 4.7. Дослідна та теоретична залежності потужності електродвигуна $N_{\text{дв}}$, для забезпечення обертання біореактора від коефіцієнту заповнення k_3 (внутрішній радіус $R=0,2$ м, робоча довжина $L=0,6$ м, кутова швидкість $\omega=0,11$ рад/с) при коефіцієнті занурення $k_{3н}=1$

Аналіз графіка (рис. 4.7) на екстремуми дозволяє зробити висновок, що мінімальні енерговитрати $N_{\text{дв}}=8,4$ Вт забезпечуються із коефіцієнтом заповнення

метантенку біомасою $k_3=0,93$, який відповідає проведеним модельним експериментам та теоретичним дослідженням (рис. 4.4, 4.5).

Розбіжність між графіками потужності, які отримані теоретичним та експериментальним шляхом, можна пояснити тим, що ККД підшипників насправді нижчий ніж це заявлено в їх характеристиці заводом виробником. Крім того деякий вплив має неоднорідність біомаси, що виливається в додаткові пульсації споживаної потужності при обертанні метантенка та збільшує середнє значення потужності на обертання метантенка.

Також було проведено дослідження впливу коефіцієнта заповнення на глибину занурення, в зовнішньому корпусі, обертового метантенку. З практичних міркування глибину занурення метантенку зручно виразити через коефіцієнт занурення k_{zn} :

$$k_{zn} = \frac{h_{zn}}{D_B}, \quad (4.5)$$

де k_{zn} - коефіцієнт занурення реактора; h_{zn} - глибина занурення реактора, м; D_B – зовнішній радіус біореактора, м.

Проведені дослідження впливу коефіцієнта заповнення на коефіцієнт занурення дозволили отримати графічну залежність (рис. 4.8).

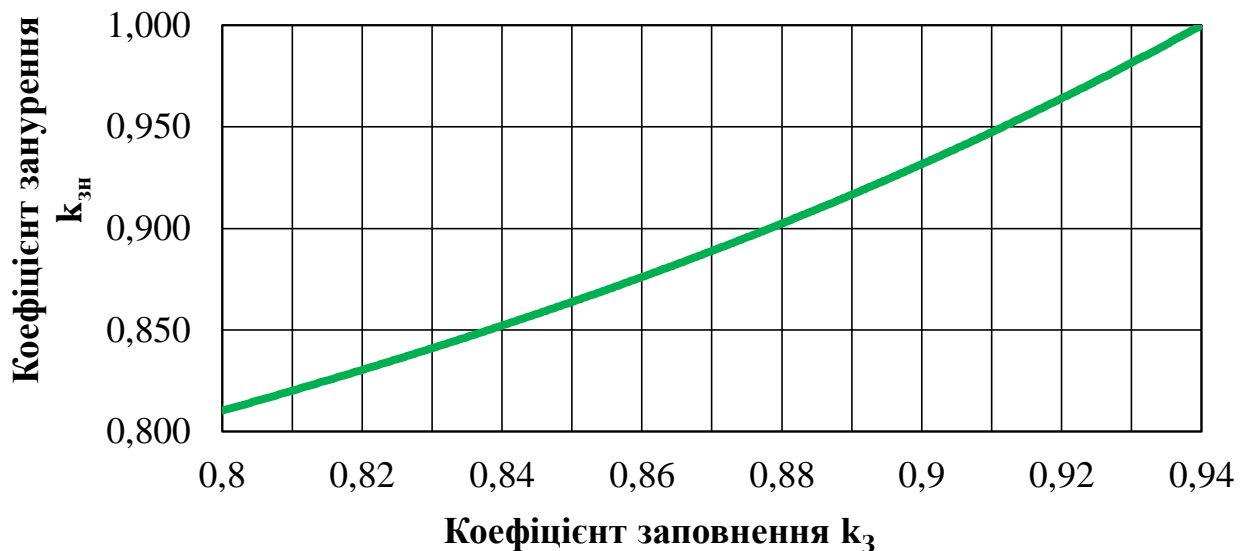


Рис. 4.8. Дослідна залежність коефіцієнта занурення k_{zn} від коефіцієнта заповнення k_3 , при яких забезпечується плавання дослідного реактора (внутрішній радіус $R=0,2$ м, робоча довжина $L=0,6$ м, кутова швидкість $\omega=0,11$ рад/с)

Аналіз графіка (рис. 4.8) дозволяє зробити висновок про те, що при значеннях коефіцієнта заповнення $k_3 < k_{3opt}=0,93$ умова плавання забезпечується, проте нераціонально використовується місткість метантенка, що призводить до підвищення питомих енерговитрат. А при $k_3 > k_{3opt}=0,93$ умова плавання не забезпечується, що призводить до різкого збільшення витрат енергії в підшипниках реактора.

Також, проведено дослідження впливу коефіцієнтів заповнення k_3 та занурення k_{zn} на питому потужність N_{II} перемішування біомаси в реакторі, що

дозволили, за допомогою регресивного аналізу результатів, отримати коефіцієнти відповідної емпіричної залежності:

$$n_{\Pi} = 806,5312 - 1588,2848k_3 + 313,9577k_{zn} + 971,9074k_3^2 - 579,0525k_3k_{zn} + 114,5044k_{zn}^2, \quad (4.6)$$

де n_{Π} – питома потужність перемішування біомаси в метантенку, Вт/м³; k_3 – коефіцієнт заповнення метантенка субстратом (біомасою); k_{zn} – коефіцієнт занурення метантенка.

Визначенні коефіцієнти регресії рівняння (4.6) дозволяють отримати графічну залежність (рис. 4.9).

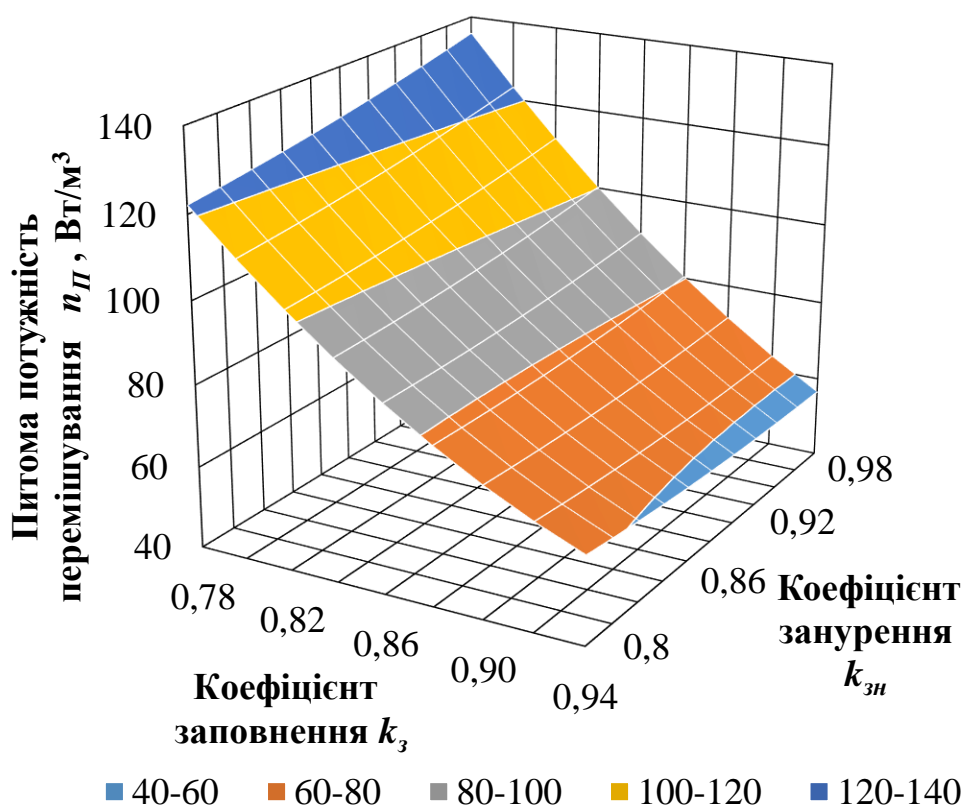


Рис. 4.9. Залежність питомої потужності n_{Π} перемішування біомаси в реакторі від коефіцієнтів заповнення k_3 та занурення k_{zn} (внутрішній радіус $R=0,2$ м, робоча довжина $L=0,6$ м, кутова швидкість $\omega=0,11$ рад/с)

Аналіз графіка (рис. 4.9) дозволяє зробити висновок про те, що при значеннях коефіцієнта заповнення $k_3=k_{зонт}=0,93$ забезпечуються мінімальні питомі енерговитрати на перемішування субстрату (обертання метантенку). При цьому, спостерігається повне занурення метантенку у рідину, тобто коефіцієнт занурення $k_{zn}=1$.

4.2. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва теплової енергії із соломи зернових та результати їх перевірки у виробництві

Із технологічного ланцюга конверсії соломи зернових культур походить матриця, що характеризує технологічні операції, які необхідно виконати для підготовки соломи до спалювання (таблиця 4.2).

З конструкційних міркувань, а також виходячи із мінімального числа технологічних операцій при заготівлі соломи (таблиця 4.2) та мінімізації витрат доречним є використання для спалювання в котлах рулонів.

Таблиця 4.2

Технологічні операції з підготовки соломи зернових до спалювання

Технологічна операція	Вид палива		
	Січка на брикети (пелети)	Рулони (тюки)	Січка
Підбирання із валків	так		так
Підбирання та ущільнення у рулони (тюки)		так	
Перевезення до проміжного місця зберігання	так	так	так
Скиртування	так	так	так
Виробництво брикетів (пеллет)	так		
Подрібнення			так
Зберігання	так	так	так
Кількість технологічних операцій	5	4	5

Відповідно до технічних характеристик рулонних прес-підбирачів соломи встановлено основні параметри рулонів соломи (таблиця 4.3).

Знаючи витрати палива, та враховуючи геометричні розміри розподільника повітря та рулона соломи (таблиця 4.3), на основі проведених досліджень, можна встановити діаметр топки D_K та висоту H_K котла, а також кількість його завантажень на добу.

Таким чином, для потужностей котла (рис. 4.10) від 10 до 70 кВт в якості палива доречно використовувати січку соломи, що дозволяє зменшити габарити котла (діаметр топки D_{TK} від 0,48 м (для $P_K=10$ кВт) до 0,96 (для $P_K=70$ кВт) , висота котла H_K лежить в діапазоні від 1,6 до 2,55 м). Для котлів із більшою потужністю доречно використовувати рулони діаметром від 1,1 до 1,45 м (для P_K від 130 до 200 кВт).

Дослідження впливу параметрів котлів із верхнім горінням на енергетичну ефективність спалювання соломи зернових проведено із використанням відповідного обладнання (на базі котла КГВ 20 (рис. 4.10) та за методикою описаною в розділі 3.3, дозволили встановити (таблиця 4.4) вплив подачі повітря пропонованим розподільником в робочі області котла на вміст CO в димових газах та на дійсну теплову потужність котла.

Основні характеристики рулонів соломи

Параметри рулону	Марка пакувальника							
	ПРФ-110	ПРФ-145	ПРФ-180	ПРП-750М	ППР-110	ППР-1,6	ПР-1,2	ПР-Ф-750
Ширина захвату, м	1,45	1,45	1,65	1,65	1,25	1,6	1,2	1,65
Діаметр рулона, м	1,1	1,45	1,8	1,8	1,1	1,8	1,2	1,8
Довжина рулона, м	1,2	1,2	1,5	1,5	1,2	1,5	1,2	1,5
Об'єм рулона, м ³	1,1	2,0	3,8	3,8	1,1	3,8	1,4	3,8
Мінімальна маса рулона, кг	80	150	300	300	80	150	90	300
Максимальна маса рулона, кг	130	250	500	500	130	200	140	500
Мінімальна щільність рулона, кг/м ³	70	76	79	79	70	39	66	79
Максимальна щільність рулона, кг/м ⁴	114	126	131	131	114	52	103	131



а



б

Рис. 4.10. Котел КГВ-20 (а) із верхнім горінням для спалювання соломи-січки ($P_k=20$ кВт) та його розподільник повітря (б)

Узагальненні результати експериментальних досліджень енергетичної ефективності котла із верхнім горінням ($P_{к}=20$ кВт)

Витрата повітря в топці котла $V_{заг}$, м ³ /с	Середнє значення вмісту CO в димових газах n_{CO} , млн ⁻¹	Температура повітря на вході в нагрівну порожнину котла, град	Температура повітря на виході із нагрівної порожнини котла $t_{вих}$, °C	Коефіцієнт емісії CO k_{CO} , г/ГДж	Концентрація CO в димових газах c_{CO} , г/м ³	Питомий вміст CO у димових газах v_{CO} , мг/м ³	Коефіцієнт корисно дії котла η_k , %	Дійсна теплова потужність котла $P_{кв}$, кВт
0,0015	2092	21	61	0,29	2,61	2615	54,9	7,7
0,0053	308	23	104	0,15	0,38	385	65,4	15,6
0,0070	173	24	110	0,11	0,22	216	82,8	16,6
0,0088	223	25	108	0,18	0,28	279	80,8	16,0
0,0177	310	25	105	0,51	0,39	388	78,0	15,4
0,0353	424	24	102	1,40	0,53	530	75,1	15,0
0,0401	588	25	101	2,21	0,73	735	74,1	14,6

Залежність питомого вмісту CO у димових газах досліджуваного котла від подачі повітря в топку котла наведено на рис. 4.11.

Із аналізу отриманих даних випливає, що питомий вміст CO у димових газах набуває мінімальних значень при усталеному режимі роботи котла, а в пусковому режимі питомі викиди мають значення на порядок вищі. Проте загальні викиди CO в атмосферу лежать в межах норми ($k_{CO} \leq 7,9$ г/ГДж, рис. 4.12), так як витрата димових газів в пусковому режимі незначна.

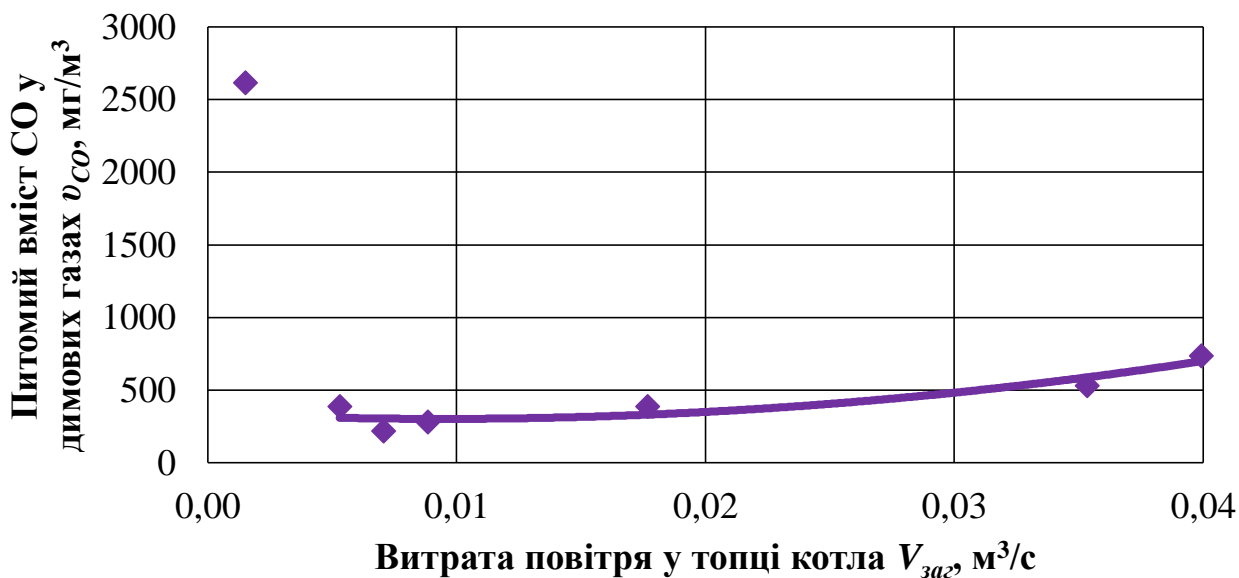


Рис. 4.11. Дослідна залежність питомого вмісту CO v_{CO} у димових газах від загальної подачі повітря $V_{заг}$ в робочій області котла

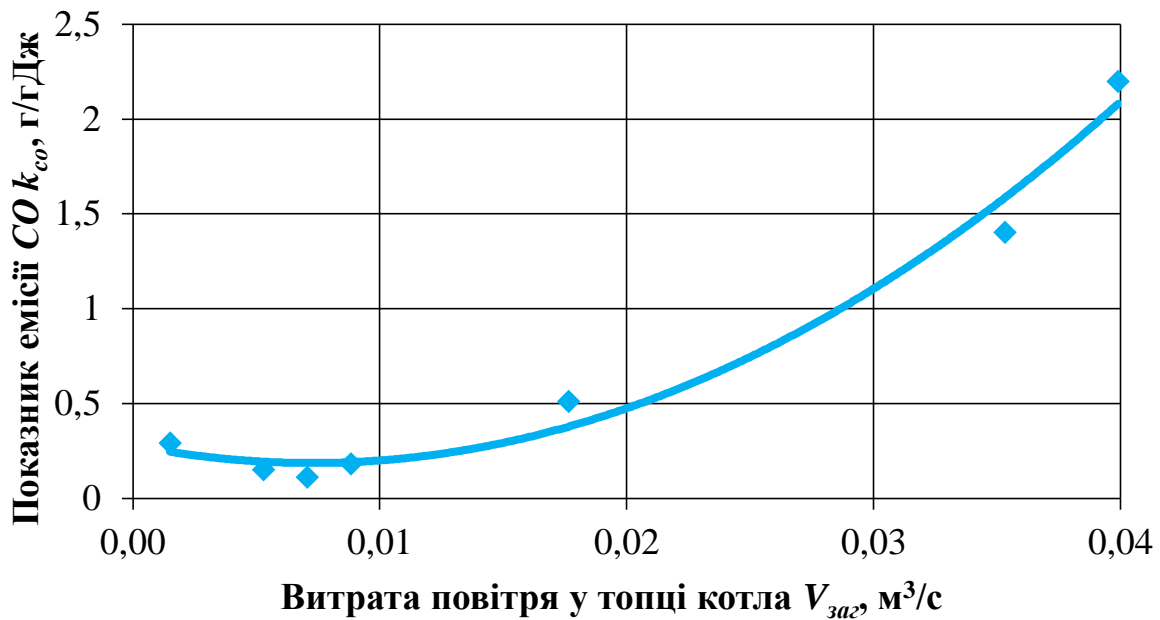


Рис. 4.12. Залежність показника емісії CO k_{CO} у димових газах від загальної $V_{заг}$ подачі повітря в робочі області котла

В усталеному режимі питомий вміст CO у димових газах досліджуваного котла може бути описаний (з рівнем довірчої імовірності – $R^2=0,87$) залежністю:

$$v_{CO}=426139V_{заг}^2-8032,8V_{заг}+339,64. \quad (4.7)$$

Мінімальних значень питомий вміст CO $v_{CO}=216$ мг/м³ набуває при загальній подачі повітря в топку котла $V_{заг}=0,0071$ м³/с, що на 4 % нижче ніж встановлено теоретично.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено залежність дійсної теплової потужності котла із верхнім горінням від витрат повітря в топці котла (рис. 4.13).

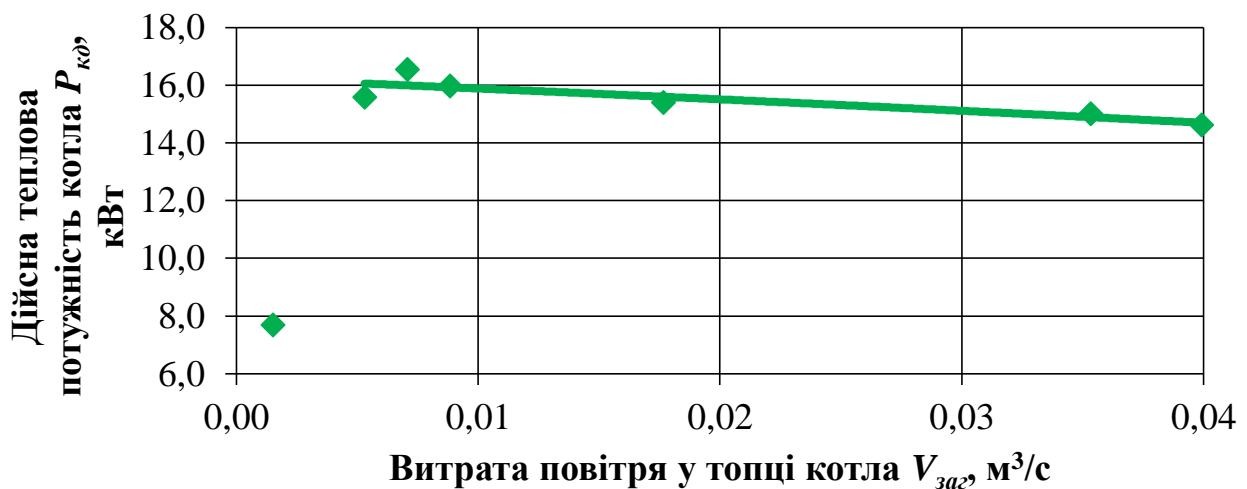


Рис. 4.13. Залежність теплової потужності котла $P_{кд}$ від загальної $V_{заг}$ подачі повітря в робочі області котла

В усталеному режимі роботи залежність теплової потужності котла із верхнім горінням КГВ-20 від подачі повітря пропонованим розподільником в

робочі області котла може бути описано (з рівнем довірчої імовірності – $R^2=0,74$) як:

$$P_{к0} = -98,685V_{заг}^2 - 34,772V_{заг} + 16,243. \quad (4.8)$$

Аналіз рівняння 4.8. та графіка на рис. 4.12 дозволяє зробити висновок, що максимальну теплову потужність $P_{к0}=16,6 \text{ кВт}$ котел КГВ 20 із верхнім горінням розвиває при подачі повітря в топку на рівні $V_{заг}=0,0071 \text{ м}^3/\text{с}$, а ККД при цьому становить $\eta_k=82,8 \%$.

Проведенні практичні і теоретичні дослідження ефективності котлів із верхнім горінням дозволили отримати раціональні параметри енергоефективних котлів (таблиця. 4.5).

Таблиця 4.5

Раціональні параметри котлів із верхнім горінням для спалювання соломи

Теоретична теплова потужність P_k , кВт	Витрати біомаси за добу G_b , кг	Загальні витрати повітря $V_{заг}$, $\text{м}^3/\text{с}$	Кількість завантажень $n_{заг}$	Діаметр топки $D_{ТК}$, м	Висота топки $H_{ТК}$, м	Висота загальна H_k , м	Коефіцієнт корисної дії η_k	Робоча теплова потужність $P_{кр}$, кВт	Потужність вентилятора подачі повітря $P_{вт}$, Вт
10	66,7	0,00369	3	0,48	1,30	1,70	80	8	25
20	133,3	0,00738	3	0,72	1,15	1,60	83	16	45
30	200,0	0,01108	3	0,96	1,00	1,60	84	25	70
40	266,7	0,01477	4	0,96	0,90	1,65	84	34	90
50	333,3	0,01846	4	0,96	1,10	2,05	85	43	115
60	400,0	0,02215	4	0,96	1,30	2,20	86	52	140
70	466,6	0,02584	4	0,96	1,55	2,55	88	62	160
80	533,3	0,02954	3	1,3	1,20	2,10	90	72	185
90	600,0	0,03323	3	1,3	1,20	2,25	90	81	210
100	666,6	0,03692	4	1,3	1,20	2,35	90	90	230
110	733,3	0,04061	2	1,3	2,40	3,70	90	99	255
120	800,0	0,04430	2	1,3	2,40	3,80	90	108	280
130	866,6	0,04800	2	1,6	2,40	3,65	90	117	300
140	933,3	0,05169	2	1,6	2,40	3,75	90	126	325
150	999,9	0,05538	2	1,6	2,40	3,85	90	135	345
160	1066,6	0,05907	2	1,6	2,40	3,95	90	144	370
170	1133,3	0,06276	2	1,6	2,40	4,05	90	153	395
180	1199,9	0,06645	2	1,6	2,40	4,15	90	162	415
190	1266,6	0,07015	3	1,6	2,40	4,24	90	171	440
200	1333,3	0,07384	3	1,6	2,40	4,34	90	180	460

Для підвищення ефективності роботи котла, за рахунок зменшення часу його роботи в перехідних режимах, пропонується використання автоматичної

системи керування подачею повітря в топку котла, що складається із мікропроцесорного пристрою АТОС, датчика температури, встановленого в нагрівну порожнину котла (рис. 4.14) та датчика вмісту СО в димових газах, встановленого в патрубок для видалення продуктів згорання.



Рис. 4.14. Система керування котлом:

1 – вентилятор подачі повітря в топку котла, 2 – мікропроцесорний блок керування, 3 – температурний датчик.

В котлах потужністю P_k до 70 кВт використовується січка соломи, що завантажується через бокові дверцята. Котли більшої потужності ($P_k=80\dots200$ кВт) завантажуються рулонами соломи через верхню частину котла, яка виконана знімною. Тому, для таких котлів необхідно передбачити використання вантажопідйомного обладнання для механізації завантаження рулонів (рис. 4.15).

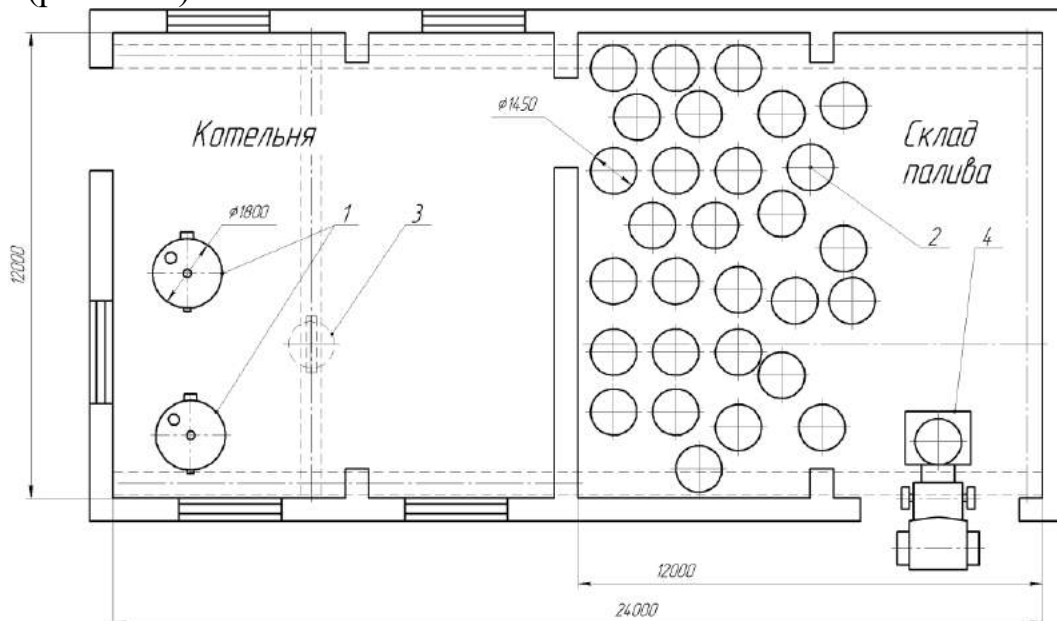


Рис. 4.15. Схема котельні, що оснащена котлами КГВ 200 із верхнім горінням для спалювання соломи в рулонах:

1 – котел ($P_k=200$ кВт), 2 – рулон соломи ($d_m=1,45$ м; $h_m=1,2$ м); 3 – кран-балка (оснащена захватом для рулонів); 4 – транспортний засіб для переміщення рулонів соломи до складу палива.

Пропоновані котли для спалювання рослинної біомаси за рахунок використання удосконаленої конструкції розподільника повітря, яка дозволяє збільшити площу горіння палива із збереженням стабільної подачі повітря в зону утворення генераторного газу, а також забезпечити ефективне спалювання горючих газів за рахунок подачі додаткового повітря в камеру згорання котла, дозволяють до 19% підвищити віддачу тепла в порівнянні із прямим спалюванням соломи в котлах іншого типу.

Дійсний коефіцієнт корисної дії котлів із верхнім горінням, що оснащені розробленим розподільником повітря досягає 82,8 %

4.3. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва рідкого біопалива в циркуляційних реакторах та результати їх перевірки у виробництві

В сільськогосподарському виробництві виготовлення дизельного біопалива доречно розділити на три основні етапи (рис. 4.16): отримання олії, отримання біопалива, зберігання палива.

Причому, з метою скорочення технологічних операцій необхідно поєднати зберігання дизельного біопального із видаленням метилового спирту.

Для отримання дизельного біопалива (за агропромисловою технологією виробництва [197]) необхідно рослинну олію змішати з метилатом калію (провести процес естерифікації). Впродовж певного часу змішана суміш розділяється на метиловий ефір та гліцериновий осад. Метиловий ефір відстоюють впродовж певного часу і видаляють отриманий гелеподібний осад, після чого отримане дизельне біопаливо перекачують в ємність для зберігання.

Обладнання для виробництва дизельного біопалива працює наступним чином [207, 208] (рис. 4.17): циркуляційний змішувач 4 заповнюється рослинною олією, із місткості для каталізатора 5 в циркуляційний змішувач 4 подається метилат калію.

Під час перемішування емульсії насос 7 забирає емульсію із нижньої частини циркуляційного змішувача 4 і підводить її до форсунок, які забезпечують інтенсивне перемішування емульсії. Після повного проходження метанолізу рослинної олії отримана емульсія залишається у циркуляційному змішувачі до повного розділення на фракції дизельного біопалива та гліцеринового осаду. Рівень гліцеринового осаду контролюється за допомогою спеціального пристрою. Відкачування дизельного біопалива здійснюється насосом 8 для відкачування дизельного біопалива через патрубок, який встановлений на поплавковому пристрої. Дизельне біопаливо перекачується в ємність для зберігання біопалива 9, яка оснащена пристроєм для видалення метанолу.

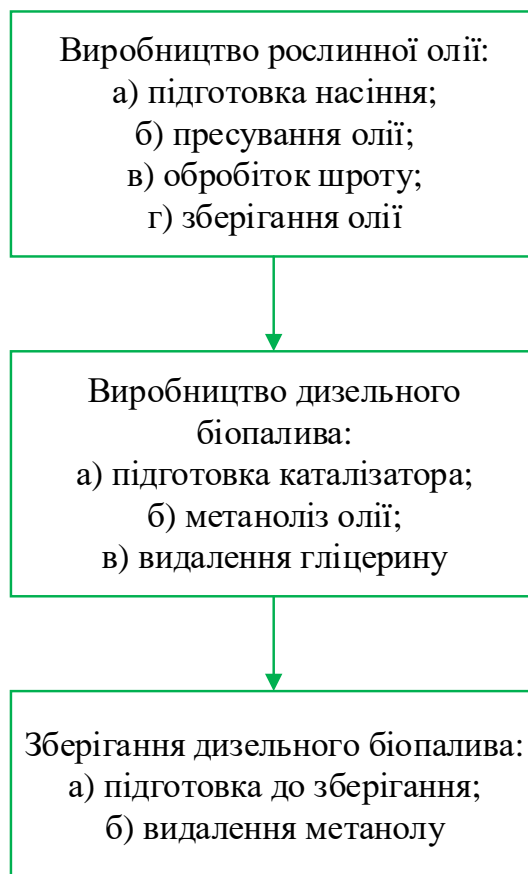


Рис. 4.16. Технологічний ланцюг отримання дизельного біопалива

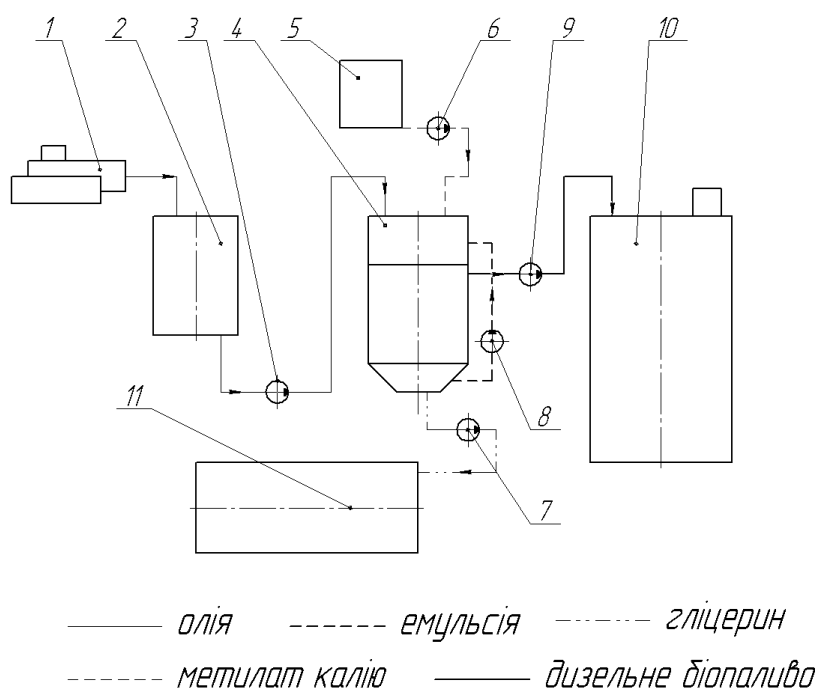


Рис. 4.17. Схема виробництва дизельного біопалива із використанням циркуляційних змішувачів-розділювачів:

1 – прес; 2 – ємкість для зберігання олії; 3, 6, 7, 8, 9 – насоси; 4 – циркуляційний змішувач-розділювач; 5 – ємкість для каталізатора; 10 – ємкість для зберігання дизельного біопалива (відстійник-накопичувач); 11 – ємкість для зберігання гліцерину

Пропоноване обладнання для виробництва дизельного біопалива забезпечує зменшення витрат енергії на перемішування та спрощення конструкції обладнання при забезпеченні показників якості дизельного біопалива.

Параметри гідродинамічного розділювача (рис. 4.18) встановлено в результаті теоретичних досліджень та розраховано (висота H_P , висота області проходження реакції H_{PP} , висота області відстоювання гліцерину H_{BG}) виходячи із встановлених типорозмірів корпусів вертикальних апаратів з конічним днищем [184, 185].



Рис. 4.18. Зовнішній вигляд (а) та процес роботи (б) циркуляційного реактора змішувача-розділювача для отримання дизельного біопалива ЦРПР-2

В процесі досліджень енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива в циркуляційних змішувачах, згідно трьох-факторного експерименту за планом Бокса-Бенкіна, встановлено вплив числа обертів насоса n , діаметра сопла d_ϕ та кута встановлення форсунок β_ϕ циркуляційних реакторів-розділювачів на потужність N_d , що витрачається на перемішування та циркуляцію емульсії (таблиця 4.6).

В результаті регресійного нелінійного аналізу результатів досліджень енергетичної ефективності циркуляційного змішувача встановленні значення коефіцієнтів відповідного поліноміального регресійного рівняння:

$$P_d = 123,3926 - 0,4103n + 0,407d_\phi + 0,0006n - 0,0039d_\phi^2, \quad (4.9)$$

де P_d – потужність, що витрачається на циркуляцію та перемішування біомаси, Вт; n – число обертів гідронасоса, об/хв; d_ϕ – діаметр сопла форсунки, мм.

Адекватність пропонованого рівняння було оцінено за критерієм Фішера $\Phi = 2,4645 < \Phi_T = 2,5336$.

Таблиця 4.6

Узагальненні результати експериментальних досліджень енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива в циркуляційному змішувачі

№ П/П	Частота обертів гідронасоса n , об/хв	Кут нахилу форсунок β_ϕ , град	Вихідний діаметр форсунок d_ϕ , мм	Вимірювані дані					Загальний об'єм перекачаної емульсії Q , м ³	Питома затрачена потужність n_e , кВт год/м ³
				Загальна споживана потужність гідронасосом $N_{зас}$, Вт	Споживана потужність гідронасосом в холостому режимі N_x , Вт	Споживана потужність гідронасосом на перекачування та перемішування емульсії N_o , Вт	Час затрачений на перемішування та та циркуляцію емульсії $t_{пер}$, год	Загальна затрачена потужність N , кВт·год		
1	1400	90	13	955,0	250	705,0	0,5	0,48	42,0	0,011
2	200	0	13	221,5	150	71,5	0,5	0,11	6,0	0,018
3	1400	0	13	967,5	250	717,5	0,5	0,48	42,0	0,012
4	200	90	13	221,5	150	71,5	0,5	0,11	6,0	0,018
5	1400	45	17	962,5	250	712,5	0,5	0,48	42,0	0,011
6	200	45	9	222,0	150	72,0	0,5	0,11	6,0	0,019
7	1400	45	9	1047,5	250	797,5	0,5	0,52	42,0	0,012
8	200	45	17	219,0	150	69,0	0,5	0,11	6,0	0,018
9	800	90	17	404,5	225	179,5	0,5	0,20	24,0	0,008
10	800	0	9	419,0	225	194,0	0,5	0,21	24,0	0,009
11	800	90	9	420,0	225	195,0	0,5	0,21	24,0	0,009
12	800	0	17	405,5	225	180,5	0,5	0,20	24,0	0,008
13	800	45	13	400,0	225	175,0	0,5	0,20	24,0	0,008
14	800	45	13	405,0	225	180,0	0,5	0,20	24,0	0,008
15	800	45	13	408,0	225	183,0	0,5	0,20	24,0	0,009

Регресійний аналіз даних дозволив встановити, що число обертів гідронасоса n та діаметр сопла форсунки d_ϕ мають суттєвий вплив на дійсну потужність N_D , яка витрачається на перемішування та циркуляцію емульсії в змішувачі. Кут встановлення форсунок β_ϕ не має суттєвого впливу на витрати енергії на перемішування та циркуляцію емульсії.

Графічний розв'язок даного рівняння дозволив окреслити відповідну поверхню (рис. 4.19).

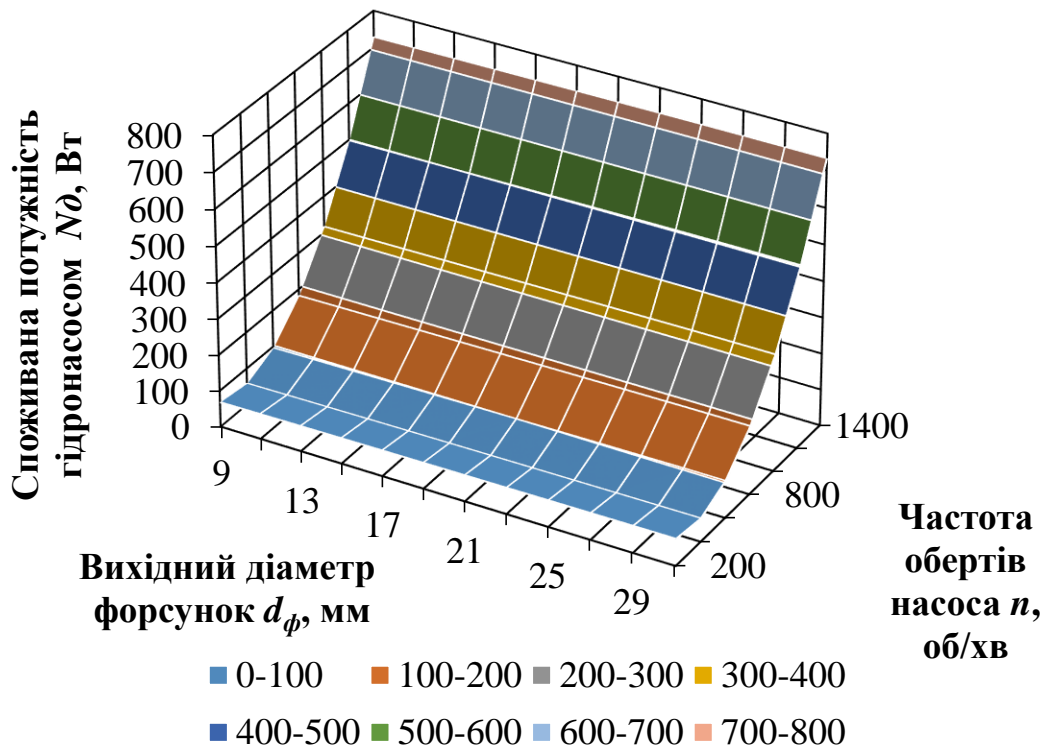


Рис. 4.19. Залежність потужності N_d , що витрачається на перемішування та циркуляцію емульсії від частоти обертів гідронасоса n та діаметра сопла форсунки d_ϕ

Дослідження поверхні відгуку (рис. 4.19) дозволило встановити, що в діапазоні обертів гідронасоса n від 800 до 1400 об/хв споживана потужність незначно знижується при зміні діаметр сопла форсунки d_ϕ в межах від 9 до 30 мм. А в діапазоні від 200 до 800 об/хв. при зміні діаметра сопла форсунки d_ϕ в межах від 9 до 30 мм споживана потужність залишається практично сталою (рис. 4.20). Також встановлено, що мінімальні енерговитрати при перемішування та циркуляції емульсії досягаються за частоти обертів гідронасоса $n=400$ об/хв (рис. 4.21).

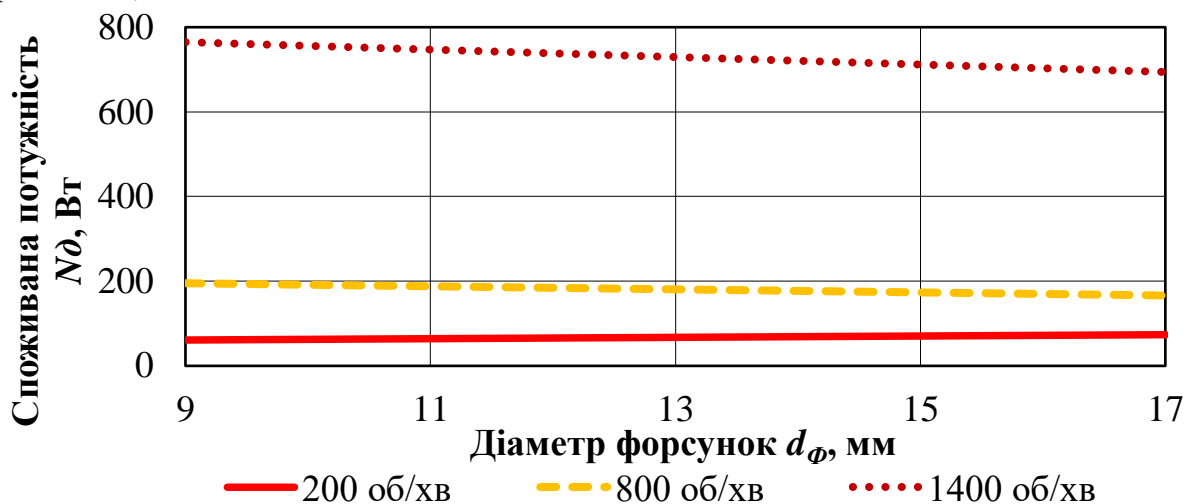


Рис. 4.20. Графіки залежності потужності N_d від діаметра сопла форсунки d_ϕ при різних частотах обертів насоса n

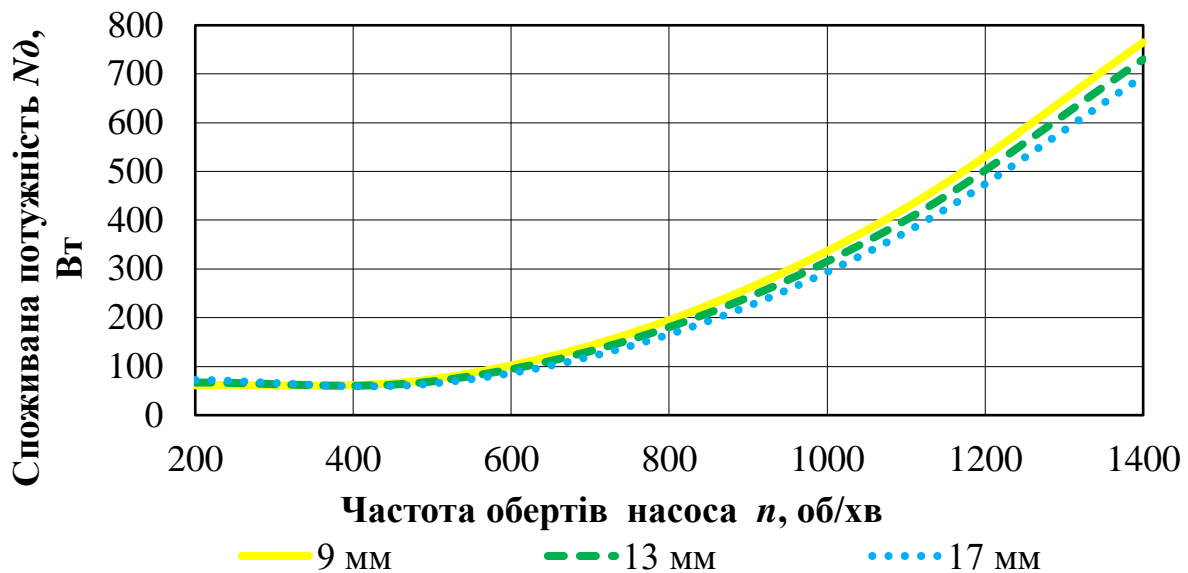


Рис. 4.21. Графіки залежності потужності N_D від частоти обертання гідронасоса n при різних вихідних діаметрах форсунки d_f

Значення споживаної потужності отримані в результаті експериментальних досліджень відповідають значення потужності розрахованим теоретично (рис. 4.22) відповідно до математичної моделі енергозберігаючого циркуляційного перемішування емульсії у циркуляційних змішувачах.

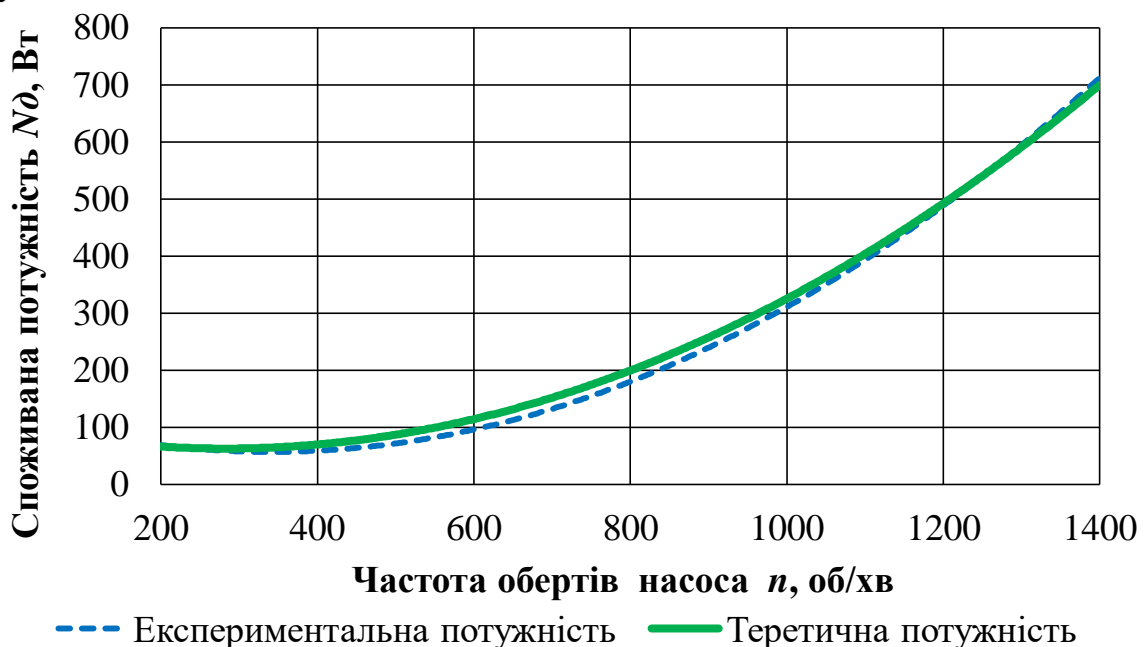


Рис. 4.22. Дослідна та теоретична залежності потужності N_D від частоти обертання гідронасоса n (діаметр форсунки $d_f=17$ мм)

Згідно проведених досліджень раціональним є встановлення мінімального вихідного діаметра форсунки $d_{fmin}=10$ мм. Для визначення максимального вихідного діаметра форсунки необхідно, за допомогою імітаційного моделювання, встановити вплив об'єму V_p та діаметра сопла d_f форсунок

циркуляційних реакторів-розділювачів на питому потужність n_T , що витрачається на циркуляцію емульсії.

Проведені імітаційні дослідження дозволили встановити емпіричну залежність між питомою потужністю n_T (Вт/м³) та номінальним об'ємом реактора V_P , (м³) і діаметром сопла форсунок d_ϕ (мм):

$$n_T = 906,390 - 246,079V_P + 4,767d_\phi + 0,227V_P^2 + 7,623V_Pd_\phi - 0,893d_\phi^2. \quad (4.10)$$

Графічний розв'язок даної залежності (рис. 4.23) дозволив встановити, що найнижчі значення питомої потужності будуть лежати в діапазоні діаметра сопла форсунок d_ϕ до 35 мм і досягнуть мінімального значення $n_T=9,8$ Вт/м³ при робочому об'ємі циркуляційного змішувача-розділювача дизельного біопального $V_P=50$ м³. Тому, максимальний вихідний діаметр сопла форсунки становитиме $d_{\phi max}=35$ мм.

Параметри циркуляційних змішувачів-розділювачів, що мають мінімальні енерговитрати на виробництво дизельного біопалива, визначенні теоретично та підтвердженні в результаті експериментальних досліджень і наведені в таблиці 4.7.

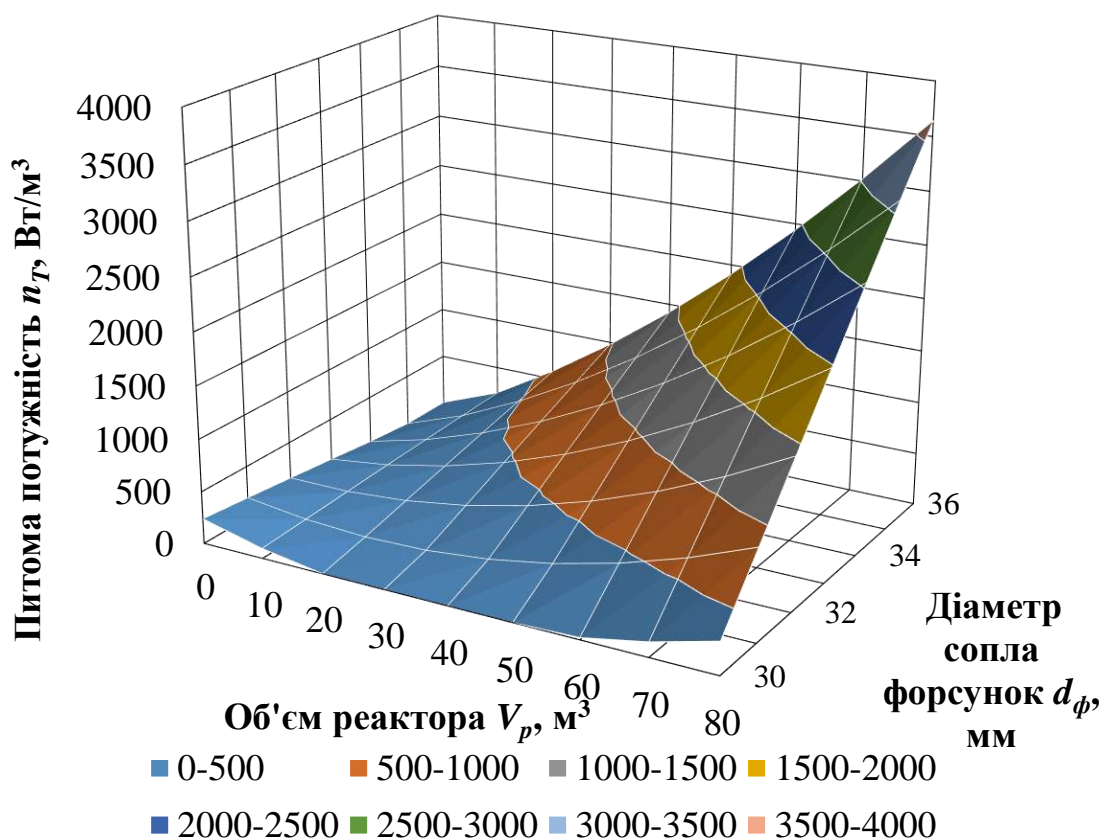


Рис. 4.23. Залежність питомої потужності n_T від номінального об'єма реактора V_P і діаметра сопла форсунок d_ϕ

Таблиця 4.7

Раціональні параметри циркуляційних змішувачів-розділювачів

Параметр	Внутрішній діаметр посудини D_p , м					
	0,8	1,2	1,4	2,2	3,0	3,2
Номинальний об'єм V_p , м ³	0,4	1	2	10	50	63
Діаметр встановлення форсунок $D_{вф}$, м	0,74	1,12	1,31	2,09	2,88	3,06
Діаметр сопла форсунки d_f , мм	20	25	30	30	30	30
Висота розділювача H_p , м	0,95	1,12	1,57	3,05	7,65	8,45
Висота встановлення форсунок $h_{вф}$, м	30	41	43	53	61	68
Кількість форсунок n_f , шт	4	4	4	4	4	4
Тиск у форсунці P_f , МПа	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Подача насоса $Q_{нас}$, м ³ /с	0,0061	0,0083	0,0087	0,0106	0,0123	0,0137
Теоретична потужність насосу N_T , Вт	61,3	83,4	173,4	318,6	490,5	685,5
Питома потужність насосу n_T , Вт/м ³	153,3	83,4	86,7	31,9	9,8	10,9
Час одного циклу $\tau_{ц}$, с	65,6	120,5	229,9	943,4	4065	4598,5
Висота області перемішування $H_{оп}$, м	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14
Висота області проходження реакції $H_{пр}$, м	0,66	0,69	1,08	2,31	6,66	7,39
Висота області відстоювання гліцерину $H_{вг}$, м	0,23	0,35	0,4	0,64	0,87	0,92
Продуктивність $П_{дбл}$, м ³ /год	0,03	0,08	0,16	0,81	4,05	5,10

Значення параметрів наведені в таблиці 4.7 забезпечують достатню ефективність перемішування емульсії в області перемішування і повне протікання реакції метанолізу в області проходження реакції із мінімальними питомими енерговитратами.

Результати досліджень впливу кратності перемішування емульсії в циркуляційному розділювачі на якість отриманого дизельного біопалива у порівнянні із механічним перемішуванням наведено в таблиці 4.8.

Результати досліджень якості дизельного біопалива (рис. 4.24) дозволяють стверджувати, що якість дизельного біопалива отриманого в циркуляційних змішувачах розділювачах відповідає нормативним показникам після одної повної циркуляції, проте найвищої якості досягає після трьохкратного перемішування.

Вплив кратності перемішування на якість дизельного біопалива (на основі ріпакової олії)

Показник	Кратність перемішування					Контроль (М)
	1	1,5	2	3	4	
Оберти насоса, об/хв	200	200	200	200	200	
Час перемішування, с	35	52	69	104	138	1800
Об'єм олії, мл	1000	1000	1000	1000	1000	500
Об'єм метилата калія, мл	150	150	150	150	150	75
Дизельне біопаливо, мл	946	945	950	950	940	475
Гліцериновий осад, мл	185	180	180	185	195	90
Час розділення суміші, хв	50	45	44	41	38	10
Кінематична в'язкість, мм ² /с	4,86	4,8	4,8	4,76	4,77	4,74

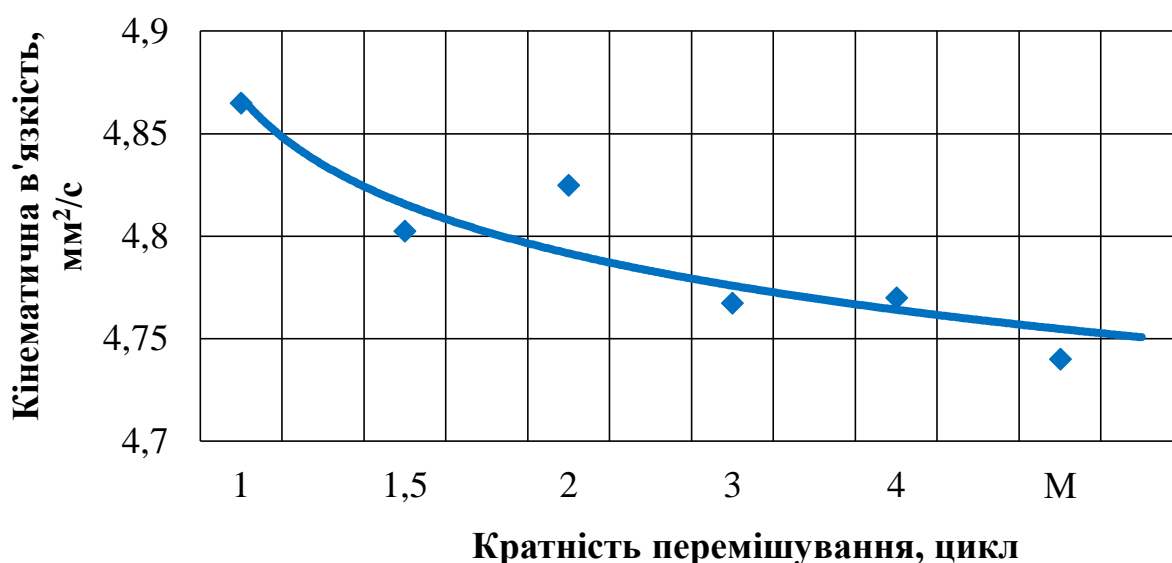


Рис. 4.24. Вплив кратності перемішування на кінематичну в'язкість отриманого дизельного біопалива

Отримане, в результаті пропонованого технологічного процесу із застосуванням циркуляційних реакторів змішувачів-розділювачів, дизельне біопаливо (на основі ріпакової та соняшникової олії) має характеристики наведені в таблиці 4.9.

Отже, одержане на експериментальній установці дизельне біопаливо за показниками якості: кінематична в'язкість, густина та температура спалаху у закритому тиглі відповідає чинному ДСТУ 6081.

Отримане дизельне біопаливо можна використовувати в дизельних двигунах тракторів та іншої мобільної техніки виконавши невелику модернізацію [209, 210, 211].

Таблиця 4.9

Параметри якості дизельного біопалива

№ п/п	Найменування дизельного палива	Назва показника					
		Густина за температури 15°C, кг/м ³		Кінематична в'язкість за температури 40°C, мм ² /с		Температура спалаху у закритому тиглі, °C	
		Фактич- но	Згідно ДСТУ 6081, у межах	Фактич- но	Згідно ДСТУ 6081, у межах	Фактич- но	Згідно ДСТУ 6081, не менше
1	Ріпаковий метиловий ефір	879	860-900	4,42	3,5-5,0	197	120
2	Соняшниковий метиловий ефір	882	860-900	4,2	3,5-5,0	204	120
3	Дизельне паливо	860	-	4,0	-	40	-
Метод випробувань		ГОСТ 3900		ДСТУ ГОСТ 33		ГОСТ 6356	

Використання отриманого дизельного біопалива у дизельних двигунах без їх конструктивних змін, згідно результатів наукових досліджень [174, 212, 213, 214, 215, 216], можливо при 30 % співвідношенні метилових ефірів жирних кислот до традиційного нафтового дизельного палива.

4.4. Висновки до розділу 4

1. У результаті проведеного аналізу можна стверджувати, що заповнений на величину від 94 до 95 % обертовий реактор для отримання біогазу з об'ємом завантаження біомаси V_B від 3 до 103 м³ (робочий діаметр лежить в діапазоні $D=1...4,3$ м) потребує мінімальної потужності для приводу N_{KP} від 299 Вт до 10,4 кВт при його зануренні у рідину на величину від 95 до 97 %. При цьому, питома потужність n_{II} приводного механізму в розрахунку на об'єм біомаси в реакторі лежатиме в межах 99,85...101,23 Вт/м³.

2. Встановлено, що при потужності котлів для спалювання біомаси (соломи зернових) від 10 до 70 кВт в якості палива доречно використовувати січку соломи, що дозволяє отримати зменшені габарити котла (діаметр топки D_{TK} від 0,48 м (для $P_k=10$ кВт) до 0,96 м (для $P_k=70$ кВт) і загальну висоту котла H_K від 1,6 до 3,41 м). Для котлів із більшою потужністю доречно використовувати рулони діаметром від 1,1 до 1,45 м (для P_k від 130 до 200 кВт). Для досліджуваного котла КГВ 20 із теоретичною тепловою потужністю $P_k=20$ кВт

питомий вміст CO $v_{CO}=216$ мг/м³ набуває мінімальних значень при загальній подачі повітря в топку котла $V_{заг}=0,0071$ м³/с, що на 4 % нижче ніж встановлено теоретично, при цьому котел розвиває максимальну дійсну теплову потужність $P_{кд}=16,6$ кВт із ККД $\eta_k=82,8$ %.

Пропоновані котли для спалювання рослинної біомаси за рахунок використання удосконаленої конструкції розсіювача повітря, що надає можливість збільшити площу горіння палива із збереженням стабільної подачі повітря в зону утворення генераторного газу, а також забезпечити ефективне спалювання горючих газів за рахунок подачі додаткового повітря в камеру згорання котла, дозволяють на 19 % підвищити віддачу тепла в порівнянні із прямим спалюванням соломи.

3. Визначено, що число обертів гідронасоса n та діаметр сопла форсунки d_f мають суттєвий вплив на дійсну потужність N_d , що витрачається на перемішування та циркуляцію емульсії в змішувачі. Кут встановлення форсунок β_f не має суттєвого впливу на витрати енергії при перемішуванні та циркуляції емульсії. В діапазоні обертів гідронасоса n від 800 до 1400 об/хв споживана потужність незначно знижується при зміні діаметр сопла форсунки d_f в межах від 9 до 30 мм. В діапазоні від 200 до 800 об/хв при зміні діаметр сопла форсунки d_f в межах від 9 до 30 мм залишається практично сталою. Мінімальні енерговитрати, на перемішування та циркуляцію емульсії об'ємом $V_p=0,15$ м³ в циркуляційному змішувачі ЦРПР-2 досягаються при частоті обертів гідронасоса НШ-100 $n=400$ об/хв, при цьому забезпечується достатня інтенсивність перемішування емульсії.

Також, встановлено, що найнижчі значення питомої потужності w_T перемішування емульсії при виробництві дизельного біопалива в циркуляційних змішувачах-розділювачах будуть належати діапазону діаметра сопла форсунок d_f від 10 до 30 мм та досягнуть мінімального значення $n_T=9,8$ Вт/м³ при робочому об'ємі циркуляційного змішувача-розділювача дизельного біопалива $V_p=50$ м³.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ АГРОЕКОСИСТЕМИ З ВИРОБНИЦТВОМ БІОПАЛИВА ТА АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ КОМПОНЕНТІВ

5.1. Економічна ефективність виробництва біогазу в обертових реакторах

На основі рівнянь (1.9)-(1.14) та моделювання біоконверсії органічної сировини (рис. 1.13-1.15) можна встановити потенціал сировини, яка може бути використана для забезпечення енергетичної автономності агроecosистем. А також визначити кількість енергії, що можна отримати при конверсії доступної біомаси галузей рослинництва та тваринництва з одночасним дотриманням позитивного балансу гумусу.

Так, встановлено залежності які дозволяють оцінити потенціал отримання енергії при прямому спалювання біомаси рослинного походження, за умови використання всієї доступної рослинної біомаси в якості енергоресурсу (крім біомаси використаної на добриво):

$$Q_{pc} = 19,828S - 0,81, \quad (5.1)$$

та за умови використання рослинної біомаси в якості субстратів для виробництва біогазу:

$$Q_{pg} = 4,199S - 0,1715, \quad (5.2)$$

де Q_{pc} , Q_{pg} – енергія отримана під час прямого спалювання біомаси рослинництва та при використанні рослинної біомаси у виробництві біогазу, ГДж; S – площа ріллі, га.

Графічно данні залежності наведено на рис. 5.1.

Отже з огляду на ефективність отримання енергії, рослинну біомасу доречно, використовувати як сировину для прямого спалювання.

Таким чином, для виробництва біогазу, в умовах сільськогосподарських підприємств, необхідно використовувати біомасу галузі тваринництва та птахівництва, а саме гній та послід.

Орієнтовно кількість енергії, що можна отримати із біогазу на основі біомаси галузі тваринництва можна представити графічно (рис. 5.2).

Та оцінити за такими залежностями:

– для зерно-молочної спеціалізації:

$$Q_{zmg} = 4,517S - 0,120, \quad (5.3)$$

– для зерно-свинарської:

$$Q_{zsg} = 3,508S - 0,165, \quad (5.4)$$

– для зерно-птахівничої:

$$Q_{zng} = 7,389S - 0,128, \quad (5.5)$$

де Q_{zmg} , Q_{zsg} , Q_{zng} – енергія при використанні біомаси тваринництва, свинарства та птахівництва, відповідно, ГДж.

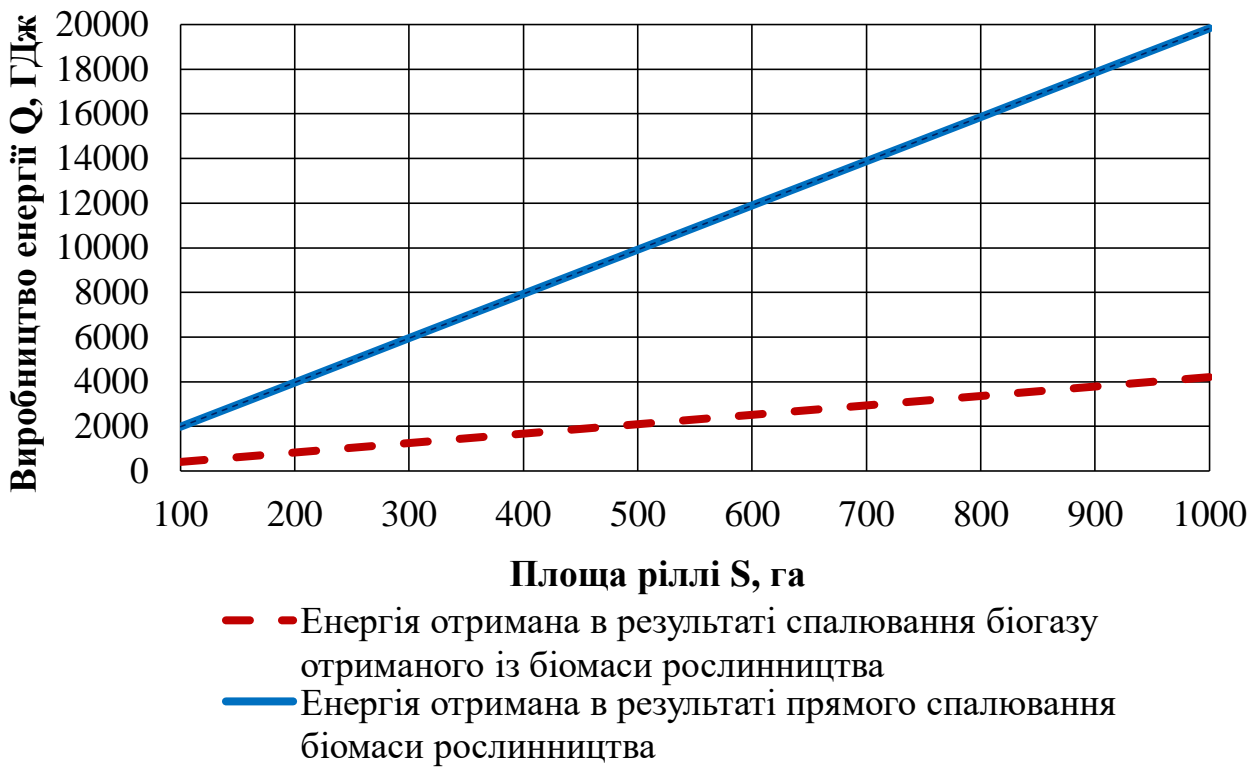


Рис. 5.1. Залежність виробництва енергії на основі рослинної біомаси від площі ріллі модельних підприємств (урожайність зернових – 30 ц/га, шестипільна сівозміна)

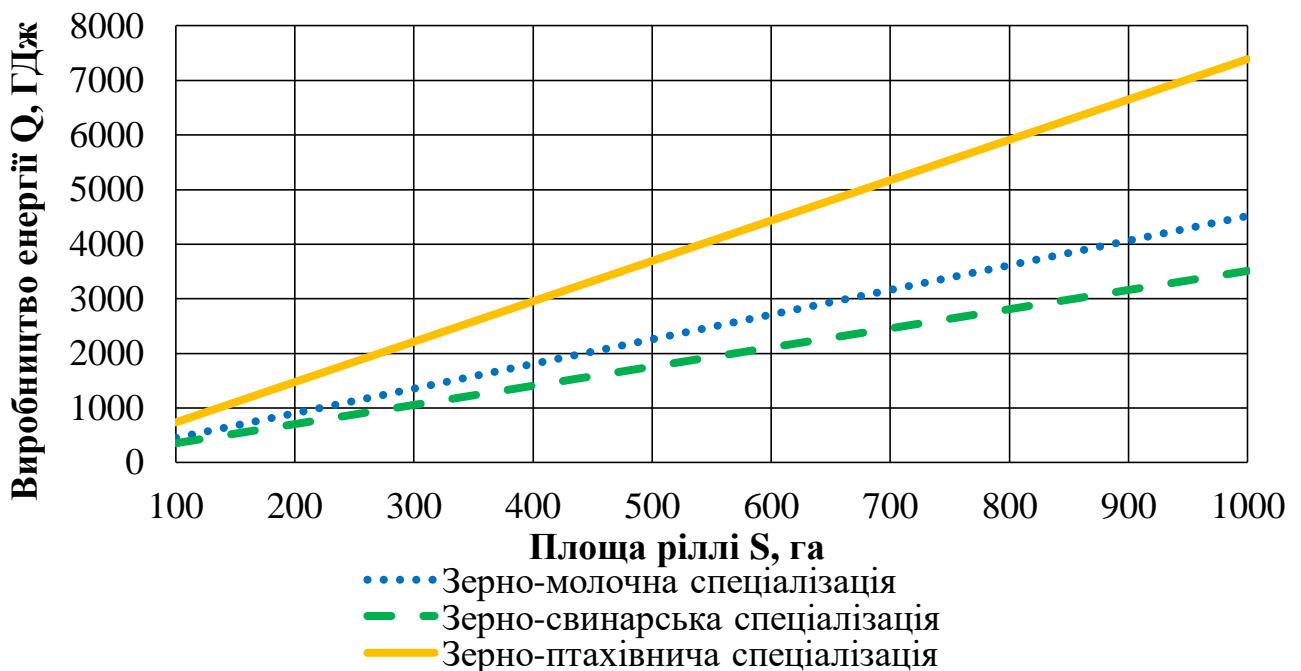


Рис. 5.2. Залежність виробництва енергії на основі біомаси галузі тваринництва від площі ріллі модельних підприємств (урожайність зернових – 30 ц/га, шестипільна сівозміна)

Витрати на виробництво біогазу можна представити, як:

$$B_B = B_{Бс} + B_{Бпр} - B_{Бдр}, \quad (5.6)$$

де V_B – річні експлуатаційні витрати при виробництві біогазу, грн; V_{Bc} – вартість сировини, грн; V_{Bnp} – вартість переробки сировини для отримання біогазу, грн; V_{Bdp} – вартість добрив отриманих в результаті виробництва біогазу, грн.

Питомі витрати, на виробництво 1 м³ біогазу в сільськогосподарському виробництві, можна оцінити як:

$$\begin{cases} \vartheta_{BGr} = \frac{C_{\bar{b}mp} + C_{np} - k_{\bar{o}} C_{\bar{o}p}}{k_{\bar{e}z} k_{\bar{b}y}} \\ \vartheta_{BGr} = \frac{C_{\bar{b}mt} + C_{nt} - k_{\bar{o}} C_{\bar{o}t}}{k_{\bar{e}z} k_{\bar{b}y}}, \end{cases} \quad (5.7)$$

де $C_{\bar{b}mp}$, $C_{\bar{b}mt}$ – вартість біомаси, яка використовується в субстратах, відповідно в галузях рослинництва та тваринництва, грн/кг; C_{np} , C_{nt} – вартість переробки біомаси, відповідно в галузях рослинництва та тваринництва, грн/кг; $C_{\bar{o}p}$, $C_{\bar{o}t}$ – вартість добрив отриманих в результаті переробки в біореакторі, грн/кг; $k_{\bar{e}z}$ – коефіцієнт виходу газу в біогазових установках, м³/кг; $k_{\bar{b}y}$ – коефіцієнт використання сировини в біогазових установках; $k_{\bar{o}}$ – коефіцієнт виробництва добрив в біогазових установках.

Річний економічний ефект, від використання обертового метантенка пропонованої конструкції, можна встановити згідно із [143, 144, 217, 218, 219, 220, 221] за залежністю:

$$E_B = (V_{B\bar{o}} + k_n C_{B\bar{i}\bar{o}}) - (V_{Bn} + k_n C_{Bin}), \quad (5.8)$$

де $V_{B\bar{o}}$, V_{Bn} – річні експлуатаційні витрати за базовим та пропонованим варіантами, відповідно, грн.; k_n – нормативний поправочний коефіцієнт; $C_{B\bar{i}\bar{o}}$, C_{Bin} – інвестиційні витрати за базовим та пропонованим варіантами, відповідно, грн.

При оцінці вартості сировини для виробництва біогазу доцільним є використання трансферних цін [222]: внутрішньогосподарських, що враховують операційно-технологічні витрати на отримання сировини, внутрішньогосподарський норматив загальногосподарських витрат, нормативний відсоток прибутку; міжгосподарських, які включають операційно-технологічні витрати на отримання сировини, внутрішньогосподарський норматив загальногосподарських витрат, внутрішньогосподарський норматив адміністративних витрат і витрат на збут, нормативний відсоток прибутку.

Вартість переробки сировини для отримання біогазу становитиме:

$$V_{Bnp} = V_{Btop} + V_{Ba} + V_{Ben} + V_{Bzn} + V_{Bze} + V_{Bze}, \quad (5.9)$$

де V_B – річні експлуатаційні витрати при виробництві біогазу, грн.; V_{Btop} – витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання для виробництва біогазу, грн; V_{Ba} – витрати на амортизацію обладнання, грн; V_{Ben} – витрати на електроенергію, грн; V_{Bzn} – фонд заробітної плати персоналу, який задіяний на виробництві біогазу, грн; V_{Bze} – загальногосподарські витрати, грн; V_{Bze} – загальногосподарські витрати, грн.

Витрати електроенергії можна встановити, орієнтуючись на технологічні етапи отримання біогазу (рис. 4.1):

$$V_{Ben} = \frac{c_e (Q_{ин} + Q_{aen} + Q_{анеп} + Q_{вб})}{3,6 \cdot 10^6} = c_e (E_{нрм} + E_{нрк} + E_{нид} + E_{mn}), \quad (5.10)$$

де c_e – вартість електроенергії, грн/кВт·год; $Q_{ин}$ – витрати енергії на перекачування та розділення сировини під час проведення низькотемпературного етапу підготовки, Дж; Q_{aen} – витрати енергії на перекачування та підігрівання сировини при проведенні аеробного етапу підготовки, Дж; $Q_{анеп}$ – витрати енергії на підігрів сировини, перекачування сировини та інокулянту під час проведення аеробного етапу підготовки, Дж; $Q_{вб}$ – витрати енергії на перекачування, перемішування та підігрівання субстрату в процесі виробництва біогазу в обертовому реакторі, Дж; $E_{нрм}$ – витрати електроенергії на перемішування субстрату, кВт·год; $E_{нрк}$ – витрати електроенергії на перекачування субстрату, кВт·год; $E_{нид}$ – витрати електроенергії на підігрівання субстрату, кВт·год; E_{mn} – витрати електроенергії на інші технологічні потреби, кВт·год.

Витрати на технічне обслуговування, ремонт, загальновиробничі та загальногосподарські витрати можна виразити через відповідні коефіцієнти, а витрати на заробітну плату за загальноприйнятими методиками [48,143, 221].

Враховуючи, що на підігрівання субстрату можна задіяти енергію прямого спалювання біомаси рослинництва, а для перемішування та перекачування субстрату використати частку електроенергії виробленої в результаті використання біогазу річні витрати на виробництво біогазу V_B , складуть:

$$V_B = \frac{BE}{k_{гз} k_{гв}} (\Pi_{бм} - k_{д} \Pi_{д}) + (1 + k_{зв} + k_{зг}) (V_{Бтор} + V_{Ба} + V_{Бпр} + V_{Бзн}), \quad (5.11)$$

де BE – вихід біогазу, м³; $\Pi_{бм}$ – вартість біомаси, яка використовується в субстратах, грн/кг; $\Pi_{д}$ – вартість добрив отриманих у результаті переробки в біореакторі, грн/кг; $V_{Бтор}$ – витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання для виробництва біогазу, грн; $V_{Ба}$ – витрати на амортизацію обладнання, грн; $V_{Бпр}$ – витрати на отримання енергії з рослинної біомаси, грн; $V_{Бзн}$ – заробітна плата персоналу, задіяному у виробництві біогазу, грн; $k_{гз}$ – коефіцієнт виходу газу в біогазових установках, м³/кг; $k_{гв}$ – коефіцієнт використання сировини в біогазових установках; $k_{зв}$ – коефіцієнт загальновиробничих витрат; $k_{зг}$ – коефіцієнт загальногосподарських витрат; $k_{д}$ – коефіцієнт виробництва добрив в біогазових установках.

Кількість виробленої електроенергії можна оцінити за формулою:

$$V_{ел} = BE b_{ел} - k_{mn} V_B n_B n_{рiчн} \tau_{д} (N_{п} + k_{нрк} N_{нрк}), \quad (5.12)$$

де $V_{ел}$ – кількість виробленої в біогазовій установці електроенергії, кВт/рік; BE – вихід біогазу, м³; $b_{ел}$ – потреба в біогазі для отримання 1 кВт електроенергії, м³/кВт; V_B – об'єм завантаження біомаси в біореактор за один цикл роботи, м³; n_B – кількість біореакторів, шт; $n_{рiчн}$ – середньорічна тривалість роботи біогазового обладнання, дiб; $\tau_{д}$ – середньодобова тривалість роботи біогазовго обладнання, год; $N_{п}$ – питома потужність перемішування субстрату, Вт/м³; $N_{нрк}$ – питома потужність перекачування субстрату, Вт/м³; k_{mn} – коефіцієнт

додаткових технологічних потреб енергії для виробництва біогазу; $k_{прк}$ – коефіцієнт кратності перекачування субстрату.

Орієнтовно кількість електроенергії, яку можна отримати із біогазу на основі біомаси галузі тваринництва (рис. 5.3) можна оцінити за залежностями:

– для зерно-молочної спеціалізації:

$$V_{зтел} = 0,558S - 5,660, \quad (5.13)$$

– для зерно-свинарської:

$$V_{зсел} = 0,488S + 0,798, \quad (5.14)$$

– для зерно-птахівничої:

$$V_{зпел} = 1,064S - 6,246, \quad (5.15)$$

де $V_{зтел}$, $V_{зсел}$, $V_{зпел}$ – електроенергія отримана при використанні біомаси ВРХ, свиней та птахів, відповідно, МВт·год.

Вартість обладнання можна встановити за формулою:

$$V_{Бобл} = V_{мат} + V_{кв} + V_{зпобл} + V_{ов}, \quad (5.16)$$

де $V_{Бобл}$ – вартість обладнання, що використовується у виробництві біогазу, грн; $V_{мат}$ – вартість основних матеріалів (металів) із яких виготовлено обладнання, грн; $V_{кв}$ – вартість комплектуючих виробів, грн; $V_{зпобл}$ – фонд заробітної плати персоналу, що задіяний у виробництві обладнання, грн; $V_{ов}$ – організаційні витрати, грн.

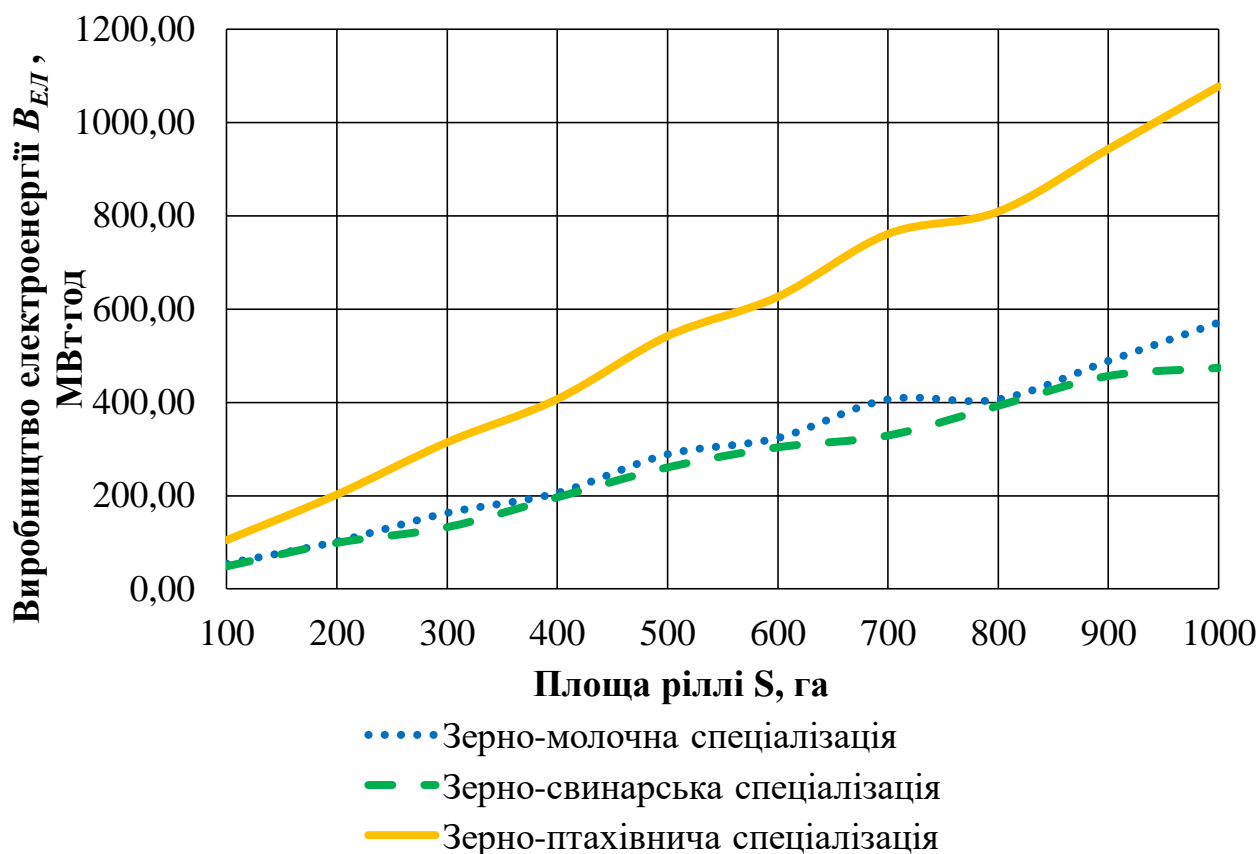


Рис. 5.3. Залежність виходу електроенергії на основі біомаси галузі тваринництва від площі ріллі модельних підприємств (урожайність зернових – 30 ц/га, шестипільна сівозміна)

Вартість основних матеріалів можна встановити, пропорційно до маси обладнання. Вартість комплектуючих виробів можна встановити, як:

$$B_{кв} = B_{елоб} + B_{нм} + B_{пр} + B_{крп}, \quad (5.17)$$

де $B_{елоб}$ – вартість електрообладнання та генераційного устаткування, грн; $B_{нм}$ – вартість основних неметалевих елементів обладнання, грн; $B_{пр}$ – вартість приладів та датчиків, грн; $B_{крп}$ – вартість кріпильних матеріалів, грн.

Витрати на заробітну плату при виготовленні обладнання можна знайти за загальноприйнятими методиками [217, 219, 220] враховуючи при цьому умови праці.

В результаті проведених розрахунків встановлено, що питома вартість обладнання (відносно виробленої електроенергії) для виробництва біогазу, знижується із зростанням площі ріллі (рис. 5.4).

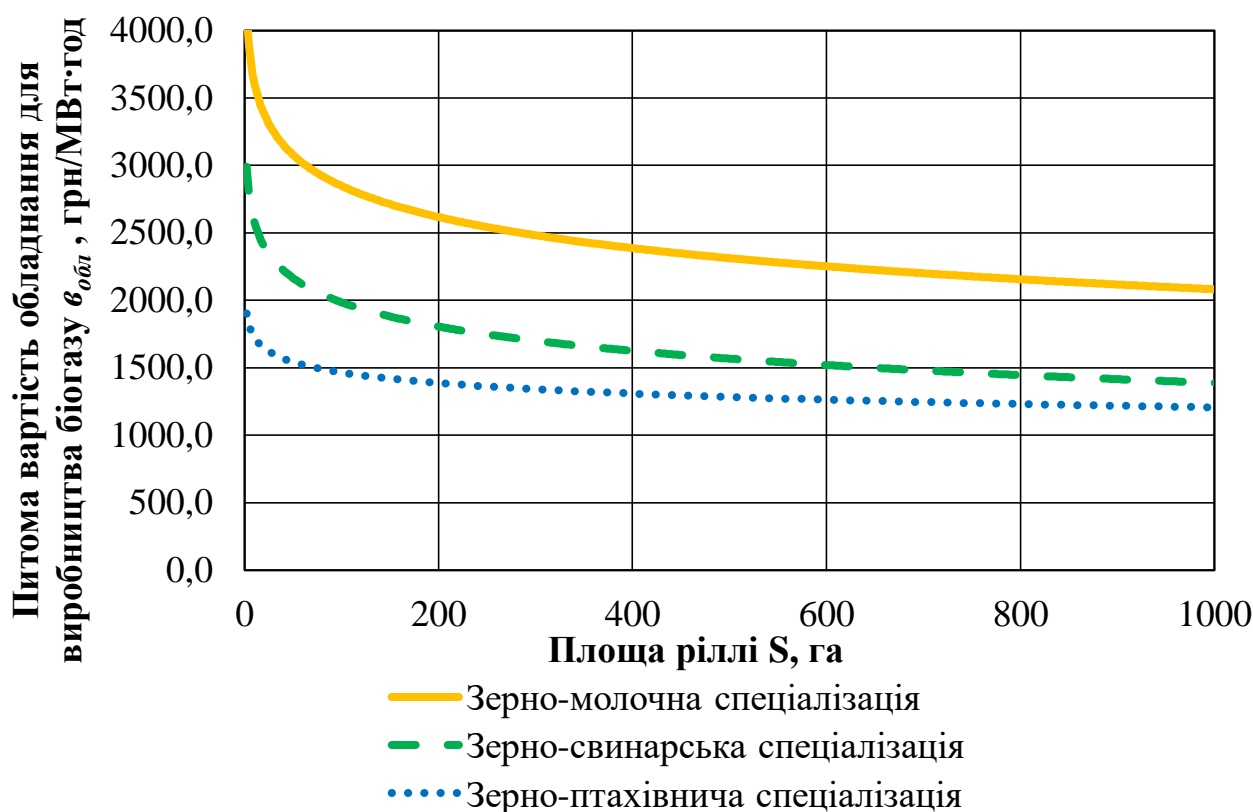


Рис. 5.4. Залежність зміни питомої вартості обладнання для виробництва біогазу в залежності від площі ріллі модельних підприємств (середня вартість основних матеріалів, із якого виготовлено обладнання – $v_{мат}$ 18 грн/кг)

Отримані залежності можна описати емпіричними рівняннями:

– для зерно-молочної:

$$v_{зобл} = -332,5 \ln S + 4379, \quad (5.18)$$

– для зерно-свинарської:

$$v_{зобл} = -137,3 \ln S + 2394, \quad (5.19)$$

– для зерно-птахівничої:

$$v_{зобл} = -112,5 \ln S + 1983, \quad (5.20)$$

де $v_{зтобл}$, $v_{зсобл}$, $v_{зпобл}$ – питома вартість обладнання для виробництва біогазу, при використанні біомаси ВРХ, свиней та птахів, відповідно, грн./МВт·год.

Знаючи річні витрати на виробництво біогазу V_B (грн) та кількість виробленої в біогазовій установці електроенергії $V_{ЕЛ}$ (кВт/рік) можна встановити собівартість виробництва біогазу:

- для зерно-молочної спеціалізації:

$$C_{зтел} = -0,183 \ln S + 1,6919, \quad (5.21)$$

- для зерно-свинарської:

$$C_{зсел} = -0,205 \ln S + 1,7982, \quad (5.22)$$

- для зерно-птахівничої:

$$C_{зпел} = -0,185S + 1,5860, \quad (5.23)$$

де $C_{зтел}$, $C_{зсел}$, $C_{зпел}$ – собівартість виробництва електроенергії в біогазових установках із використанням біомаси ВРХ, свинаней та птахів, відповідно, грн/кВт·год.

Виробнича собівартість біометану становитиме:

$$C_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}} C_{БМ} (1 - k_D) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{БМ} + ЕЛ_{БМ} + ЗП_{БМ}), \quad (5.24)$$

де $C_{БМ}$ – виробнича собівартість біометану, грн/м³; $\rho_{ПБ}$ – густина переробленої у біогазовому реакторі біомаси, т/м³; $k_{БМ}$ – вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, м³/м³·добу; $\tau_{ЗБ}$ – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб; $C_{БМ}$ – вартість біомаси, яка надходить на переробку в біогазову установку, грн/т; k_D – коефіцієнт збільшення вартості органічних добрив після анаеробного зброджування біомаси, відн. од; $k_{ЗВ}$ – коефіцієнт, що враховує загальнопромислові витрати, відн. од; $k_{ЗГ}$ – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відн. од; $ТОР_{БМ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництва біометану, грн/м³; $ЕЛ_{БМ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві біометану, грн/м³; $ЗП_{БМ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві біометану, грн/м³.

Собівартість виробництва електроенергії на основі біометану можна визначити за виразом:

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} C_{БМ} (1 - k_D) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}), \quad (5.25)$$

де $C_{ЕЛ}$ – виробнича собівартість електроенергії, грн/кВт год.; $q_{БМ}$ – теплотворна здатність біометану, МДж/м³; $\eta_{Г}$ – коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од; 3,6 – коефіцієнт перерахунку, МДж/кВт·год; $ТОР_{ЕЛ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництва електроенергії, грн/кВт год; $ЕЛ_{ЕЛ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год; $ЗП_{ЕЛ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора (рис. 5.5) є величиною, яка визначає техніко-економічні показники біогазових установок.

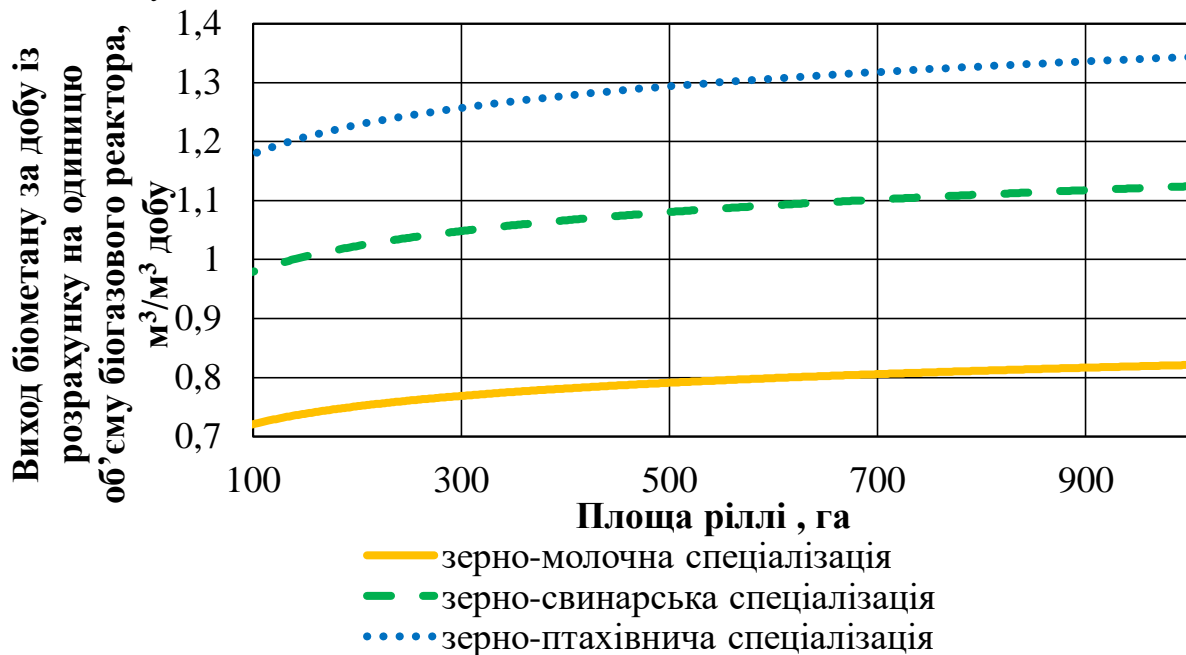


Рис. 5.5. Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора в залежності від площі ріллі модельних господарств

Розрахунки показали, що із збільшенням площі ріллі питомий вихід біогазу дещо зростає, що пояснюється збільшенням ефективності використання біогазових установок із збільшенням об'єму метантенків.

Собівартість виробництва електроенергії із біометану з прив'язкою до площі із шестипільною сівозміною приведена на рис. 5.6.

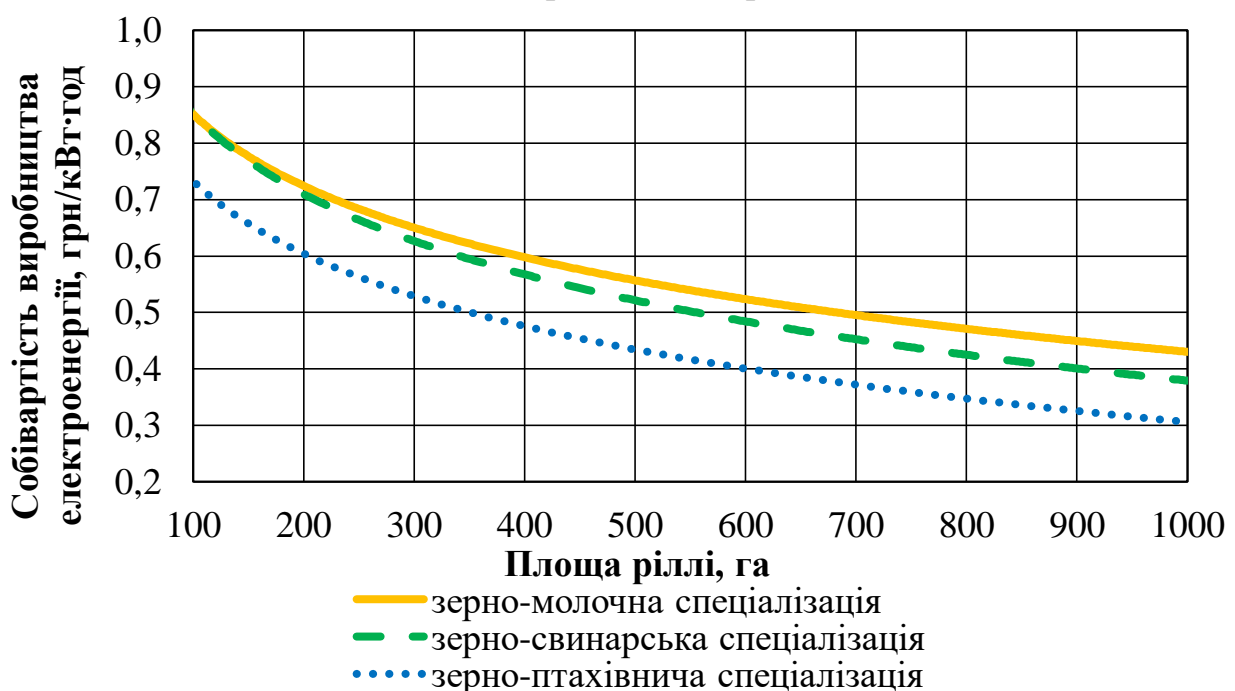


Рис. 5.6. Зміна собівартості електроенергії виробленої із біометану в залежності від площі ріллі модельних господарств

Аналіз графіка на рис. 5.6 показує що із збільшення площі ріллі понад 1000 га собівартість виробництва електроенергії на основі біогазу стабілізується на рівні від 0,30 до 0,44 грн/кВт·год.

Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора для підприємств із зерно-молочною спеціалізацією становить від 0,72 м³/м³ добу до 0,81 м³/м³ добу, а собівартість виробленої на його основі електроенергії із використанням біогазових реакторів обертового типу становить від 0,44 грн/кВт год. до 0,85 грн/кВт год. Для підприємств із зерно-свинарською спеціалізацією відповідно від 0,98 м³/м³ добу до 1,12 м³/м³ добу та від 0,38 грн/кВт год до 0,85 грн/кВт год. Для підприємств із зерно-птахівничою спеціалізацією – від 1,18 м³/м³ добу до 1,34 м³/м³ добу та від 0,30 грн/кВт год. до 0,72 грн/кВт год. Причому, менші значення виходу біометану та вищі значення собівартості електроенергії будуть мати місце при площі ріллі 100 га.

5.2. Економічна ефективність використання котлів із верхнім горінням для спалювання соломи

Визначення ефективності використання твердопаливних котлів ґрунтується на вартості палива та обладнання.

Вартість твердого палива B_{mn} (грн/т) складе:

$$B_{mn} = C_{врз} + C_{пр} + B_e, \quad (5.26)$$

де $C_{врз}$ – загальна собівартість виробництва рулонів, грн/т; $C_{пр}$ – собівартість транспортування рулонів, грн/т; B_e – витрати на вирощування та збирання зернових культур віднесенні до соломи, грн/т.

Загальну собівартість виробництва рулонів можна порахувати за формулою:

$$C_{врз} = B_e + B_{зб}, \quad (5.27)$$

де B_e – виробничі витрати, грн/т; $B_{зб}$ – додаткові витрати, грн/т.

Виробничі витрати B_e становитимуть:

$$B_e = B_a + B_{тор} + B_{нмм} + \Phi_{зн} + B_{зв} + B_{зг}, \quad (5.28)$$

де B_a – амортизаційні відрахування, грн/т; $B_{тор}$ – відрахування на ремонт і технічне обслуговування обладнання, грн/т; $B_{нмм}$ – витрати на паливо та мастила, грн/т; $\Phi_{зн}$ – фонд заробітної плати обслуговуючого персоналу, грн/т; B_m – вартість витратних матеріалів, грн/т; $B_{зв}$ – загальноновиробничі витрати, грн/т; $B_{зг}$ – загальногосподарські витрати, грн/т.

Транспортні витрати $C_{пр}$ визначаються за формулою:

$$C_{пр} = П_1 + П_2 + П_3, \quad (5.29)$$

де $П_1$ – вартість перевезення рулонів до проміжного місця зберігання (край поля), грн/т; $П_2$ – вартість перевезення рулонів до основного місця зберігання (місце спалювання), грн/т; $П_3$ – вартість складання рулонів в основному місці зберігання, грн/т.

При знаходженні транспортних витрат, необхідно враховувати амортизаційні витрати, витрати на техобслуговування і ремонт, витрати на

паливо та мастила, фонд заробітної плати та загальногосподарські та загальновиробничі витрати [5, 100].

Проведене техніко-економічне обґрунтування пакування соломи в рулони на прикладі обладнання українського виробництва та розрахунок витрат на перевезення і складання (скиртування), дозволили встановити собівартість соломи зернових культур як палива (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1

Розрахунок вартості твердого палива

Показник	Розмір-ність	Вид палива	
		рулони соломи	січка соломи
Вирощування зернових культур			
Урожайність зерна	ц/га	30	
Співвідношення соломи і зерна	од	1,2	
Урожайність соломи	ц/га	36	
Витрати на вирощування зернових до збирання	грн./т	726,75	
Кормова цінність зерна	кор.од/кг	1,1	
Кормова цінність соломи	кор.од/кг	0,17	
Витрати на вирощування зернових віднесені на соломку	грн/т	113,69	
Збирання зернових культур			
Витрати на скошування зернових у валки	грн/т	18,61	
Витрати на скошування у валки, що відносяться до витрат на соломку	грн/т	10,15	
Витрати на підбір та обмолот валків	грн/т	167,99	
Витрати на обмолот, що відносяться до витрат на соломку	грн/т	91,63	
Витрати на пряме комбайнування зернових	грн/т	189,18	
Витрати на розкидання соломи по полю	грн/т	103,19	
Витрати на скошування віднесені на соломку	грн/т	101,78	
Заготівля соломи			
Витрати на підбір та ущільнення соломи у рулони	грн/т	35,73	
Витрати на підбір соломи із валків	грн/т		19,50
Вартість витратних матеріалів	грн/т	5,60	
Витрати на перевезення соломи до проміжного місця зберігання (від 1 до 1,5 км)	грн/т	31,51	19,59
Дальність перевезення соломи до основного місця зберігання	км	5,0	
Витрати на перевезення соломи до основного місця зберігання	грн/т	76,75	39,68
Витрати на складання (скиртування) соломи	грн/т	23,20	29,48
Витрати на заготівлю соломи	грн/т	172,79	108,25
Витрати на подрібнення соломи фуражиром	грн/т		65,95
Собівартість соломи на складі	грн/т	388,26	389,68

Економічну ефективність застосування пропонованих котлів можна оцінити за допомогою порівняльної оцінки на основі базового варіанту згідно з методиками описаними в [50, 223, 224, 225, 226, 227]. Причому, вартість обладнання та інші витрати визначалась аналогічно до методик, описаних в розділі 5.1.

Для техніко-економічної порівняльної оцінки за базовий варіант обрано два котла виробництва ОАО ЮТЕМ RAU2-600М (теплова потужність $P_k=860$ кВт) та RAU2-331М ($P_k=300$ кВт), що спалюють солому у рулонах, а також газовий котел марки МН-120 ($P_k=756$ кВт). За порівняльний варіант обрано пропоновані котли із верхнім горінням КВГ-20 ($P_k=20$ кВт), що працює на соломі-січці та КВГ-200 ($P_k=200$ кВт), який працює на рулонах соломи.

Таблиця 5.2

**Техніко-економічне обґрунтування ефективності
виробництва тепла із соломи**

Параметри	Од. виміру	Базовий варіант			Пропонований варіант	
		RAU2-600М	МН-120	RAU2-331М	КВГ-20	КВГ-200 (2 котла)
Теплопродуктивність по прайсу	кВт	860	756	300	20	400
	МДж/год	3096	2722	1080	72	1440
Коефіцієнт корисної дії	відн. од	0,82	0,9	0,73	0,91	0,91
Вологість соломи	%	12	12	12	12	12
Теплота згорання соломи	МДж/кг	14,26	-	14,26		
Теплота згорання генераторного газу	ГДж/тис. м ³					12,52
Теплота згорання природного газу	ГДж/тис. м ³	-	35,16			
Витрата соломи	кг/ год	265	-	104	2,8	111,1
Витрата генераторного газу	м ³ / год				11,1	110,5
Витрата природного газу	м ³ / год	-	86			
Загальний час роботи котла	год./рік	4320	4320	4320	4320	4320
Витрата соломи за рік	т/рік	1143,5	-	449,3	12,0	480,0
Витрата генераторного газу за рік	тис. м ³				48,0	477,4
Витрата природного газу за рік	тис. м ³	-	371,5			
Річна теплопродуктивність	ГДж	13375	11757	4666	311	6221
Капіталовкладення	грн	694119	538667	385622	10031	198548

Продовження таблиці 5.2

Параметри	Од. виміру	Базовий варіант			Пропонований варіант	
		RAU2-600M	MH-120	RAU2-331M	КВГ-20	КВГ-200 (2 котла)
Відрахування на відновлення обладнання	%	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Амортизаційні відрахування	грн/рік	72882	56560	40490	1053	20848
	грн/ГДж	5,45	4,81	8,68	3,39	3,35
Величина відрахувань на ремонт та ТО	%	12	12	12	12	12
Відрахування на ремонт та ТО	грн/рік	83294	64640	46275	1204	23826
	грн/ГДж	6,23	5,50	9,92	3,87	3,83
Витрати палива на завантаження тюків	л/год.	0,50	-	0,50		
Вартість палива	грн/л	16,00	-	16,00		
Витрати палива за сезон	л	2160	-	2160		
Витрати мастила на завантаження тюків	%	4	-	4		
Вартість мастила	грн/л	18,00	-	18,00		
Витрати електроенергії на завантаження тюків	кВт/год					10800
Вартість електроенергії	грн/кВт/год					1,163
Витрати на паливо та мастило (електроенергію) для завантаження котла паливом	грн/рік	36115,20	-	36115,20		12560,4
	грн/ГДж	2,70	0,00	7,74	0,00	2,02
Встановлена електропотужність котла	кВт	3	2,8	1	0,1	1
Коефіцієнт використання потужності	відн. од	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Витрати електроенергії за рік	кВт-год	10368	9677	3456	346	3456
Вартість електроенергії	грн/кВт-год.	1,163	1,163	1,163	1,163	1,163
Витрати на електроенергію	грн./рік	12058	11254	4019	402	4019
	грн/ГДж	0,90	0,96	0,86	1,29	0,65
Обслуговуючий персонал	люд.	3	1	2	1	2
Затрати праці	люд. год	4320	1440	2880	720	2880
Годинна зарплата	грн/год	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0

Параметри	Од. виміру	Базовий варіант			Пропонований варіант	
		RAU2-600M	MH-120	RAU2-331M	КВГ-20	КВГ-200 (2 котла)
Відсоток зарплати на управління	%	10	10	10	10	10
Величина відрахувань у соціальні фонди	%	19,60	19,60	19,60	19,60	19,60
Фонд зарплати обслуговуючого персоналу	грн/рік	82668	27556	55112	13778	55112
	грн/ГДж	6,18	2,34	11,81	44,30	8,86
Всього витрат	грн/ГДж	21,46	13,61	39,01	52,84	18,71
Загальновиробничі витрати	%	5	5	5	5	5
	грн/ГДж	1,07	0,68	1,95	2,64	0,94
Загальногосподарські витрати	%	10	10	10	10	10
	грн/ГДж	2,15	1,36	3,90	5,28	1,87
Виробничі витрати на спалювання	грн/ГДж	24,68	15,65	44,86	60,77	21,51
Виробничі витрати на спалювання без вартості теплоносія	грн/рік	330070	184011	209313	18902	133819
Вартість теплоносія	грн/рік	443969	1352440	174437	4671	186360
Питомі витрати	грн/ГДж	57,9	130,7	82,3	75,8	51,5

Проведене техніко-економічне обґрунтування ефективності використання котлів із верхнім горінням дозволило встановити, що питомі витрати отримання тепла складають для котлів, які працюють на рулонах соломи RAU2 -600M (теплова потужність $P_k=860$ кВт) – 57,9 грн/ГДж та RAU2-331M ($P_k=300$ кВт) – 82,3 грн/ГДж, для котла, що працює на природному газу КВГ-200 ($P_k=200$ кВт) – 130,0 грн/ГДж (базовий варіант). Для котла із верхнім горінням, який працює на січці соломи КВГ-20 ($P_k=20$ кВт) – 75,8 грн/ГДж, а для 2-х котлів із верхнім горінням КВГ-200, що працюють на рулонах ($P_k=200$ кВт) – 51,5 грн/ГДж.

Таким чином ефективність пропонуваного котлів із верхнім горінням на 61 % вища ніж у котлів, що працюють на природному газу (за рахунок використання дешевшого палива) та на 11 % вище ніж у традиційних котлів, що працюють на соломі (за рахунок підвищення ефективності спалювання палива).

5.3. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива із циркуляційних змішувачів

Потребу в біодизельному пальному можна встановитим виходячи із питомих витрат відповідних видів палива на 1 га ріллі.

$$DE = N_{\partial} \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{m=1}^n s_{m\partial} u_{m\partial} k_{\text{екд}}^m k_{\text{вд}}^m, \quad (5.30)$$

де DE - потреба в дизельному біопальному, кг; s_i – площа виділена під вирощування i -ї культури, га; N_{∂} - норма витрат дизельного біопального, кг/га; $s_{m\partial}$ – площа виділена під m -у олійну культуру, га; $u_{m\partial}$ – урожайність m -ту олійної культури, ц/га; $k_{\text{екд}}^m$ – коефіцієнт використання олійної культури для виробництва біодизельного пального; $k_{\text{вд}}^m$ – коефіцієнт виходу біодизельного пального.

Норму витрат біодизельного пального на 1 га ріллі можна визначити, згідно із [1, 5, 228, 229, 230, 231].

Знаючи потребу в дизельному біопаливі можна підібрати необхідний об'єм реактора, його продуктивність та визначити кількість годин роботи за рік (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3

Вибір реактора змішувача-розділювача та встановлення річного фонду його роботи

Площа ріллі S , га	Норма витрат дизельного пального N_{∂} , кг/га	Загальна потреба дизельного пального N_3 , т	Загальна потреба дизельного біопального, м ³	Необхідний об'єм реактора V_P , м ³	Продуктивність $P_{\text{ДБЛ}}$, м ³ /год	Число годин роботи в рік, τ_r
100	77	7,7	8,95	0,4	0,03	298
200	77	15,4	17,91	0,4	0,03	597
300	77	23,1	26,86	1	0,08	336
400	77	30,8	35,81	1	0,08	448
500	77	38,5	44,77	1	0,08	560
600	77	46,2	53,72	2	0,16	336
700	77	53,9	62,67	2	0,16	392
800	77	61,6	71,63	2	0,16	448
900	77	69,3	80,58	2	0,16	504
1000	77	77	89,53	2	0,16	560

З даних таблиці 5.3 походить, що величина об'єму реактора змішувача-розділювача визначається в першу чергу обсягами річної партії виробництва дизельного біопалива. Крім того, чим більші витрати на виробництво дизельного біопалива упродовж одного циклу, тим більшим має бути об'єм циркуляційного реактора.

Згідно із методиками викладеними в [230, 232] економічне обґрунтування може бути виконане на основі загальноприйнятих економічних показників, а саме мінімізації витрат на виробництво дизельного біопалива в умовах сільськогосподарських підприємств.

Визначення витрат на виробництво річної партії дизельного біопалива з урахуванням загальновідомих принципів формування собівартості та з урахуванням деяких спрощень, можна записати так:

$$V_D = (1 + k_{зв} + k_{зз}) \left((k_A + k_{ТОР}) V_{обл} + V_{Дзн} + V_{Ден} \right) + V_C, \quad (5.31)$$

де V_D – загальні витрати на виробництво річної партії дизельного біопалива, грн; $V_{Дзн}$ – фонд заробітної плати персоналу, що задіяний у виробництві дизельного біопалива, грн.; $V_{обл}$ – балансова вартість обладнання для виробництва дизельного біопалива (балансову вартість циркуляційного реактора змішувача-розділювача та відстійника-накопичувача дизельного біопалива), грн; V_C – вартість сировини і матеріалів для виробництва річної партії дизельного біопалива, грн. $V_{Ден}$ – витрати на електроенергію, грн; $k_{зв}$, $k_{зз}$ – коефіцієнти загальновиробничих та загальногосподарських витрат; k_A , $k_{ТОР}$ – коефіцієнти відрахувань на амортизацію та технічне обслуговування і ремонт обладнання.

Витрати електроенергії можна встановити орієнтуючись на потребу в циркуляції емульсії та перекачування сировини, каталізатора і палива.

$$V_{Бен} = c_e \left(E_{це} + E_{прко} + E_{пркм} + E_{пркд} \right), \quad (5.32)$$

де c_e – вартість електроенергії, грн/кВт·год; $E_{це}$ – витрати електроенергії на циркуляцію субстрату, кВт·год; $E_{пркм}$ – витрати електроенергії на перекачування метанолу та каталізатора, кВт·год; $E_{прко}$ – витрати електроенергії на перекачування сировини (олії), кВт·год; $E_{пркд}$ – витрати електроенергії на перекачування дизельного біопалива, кВт·год.

Витрати на технічне обслуговування, ремонт, загальновиробничі та загальногосподарські витрати можна виразити через відповідні коефіцієнти, а витрати на заробітну плату за загальноприйнятими методиками [48, 143, 221, 231, 232].

Вартість сировини складається із вартості олії, метанолу, каталізатора, реактивів [230, 232, 233, 234].

Вартість обладнання можна встановити за формулою:

$$V_{Добл} = V_{црз} + V_{вн} + V_{д}, \quad (5.33)$$

де $V_{Добл}$ – вартість обладнання для виробництва дизельного біопального, грн; $V_{црз}$ – вартість циркуляційного реактора змішувача-розділювача, грн; $V_{вн}$ – вартість відстійника-накопичувача, грн; $V_{д}$ – вартість додаткового обладнання, грн.

Вартість циркуляційного реактора змішувача-розділювача та відстійника-накопичувача можна встановити за загальновідомими методиками, відповідно до формул (5.16) та (5.17).

Проведене згідно із формулами (5.30) - (5.33) техніко-економічне обґрунтування ефективності виробництва дизельного біопального із

використанням циркуляційних реакторів змішувачів-розділювачів дозволило встановити основні показники.

Техніко-економічні показники виробництва дизельного біопалива визначалися з урахуванням його виходу із олії біля 95 %. Густина дизельного біопалива приймалася на рівні 840 кг/м³. Ставка амортизаційних відрахувань приймалася на рівні 15 %, а відрахувань на технічне обслуговування і ремонт на рівні 8 %. Загальногосподарські та загальновиробничі витрати прийнято на рівні 5 %.

Собівартість виробництва дизельного біопалива становить від $C_D=12172$ грн/тону (для модельного підприємства із площею ріллі $S=1000$ га і реактора-змішувача ЦРПР-2 об'ємом $V_P=2$ м³) та до $C_D=12886,7$ грн/тону ($S=100$ га, ЦРПР-0,4 $V_P=0,4$ м³). При розрахунках собівартості прийнято вартість олії $B_{ол}=9700$ грн/т, а вартість метилату калію $B_{мк}=11000$ грн/т.

Залежність собівартості дизельного біопалива C_D (грн/т) від площі ріллі S (га) та об'єму реактора V_P (м³) можна предстати таким рінням:

$$C_D=12908,5495-3,3934S+606,7126V_P+0,0012S^2+0,4092SV_P-132,319V_P^2, \quad (5.34)$$

та відобразити графічно (рис. 5.7).

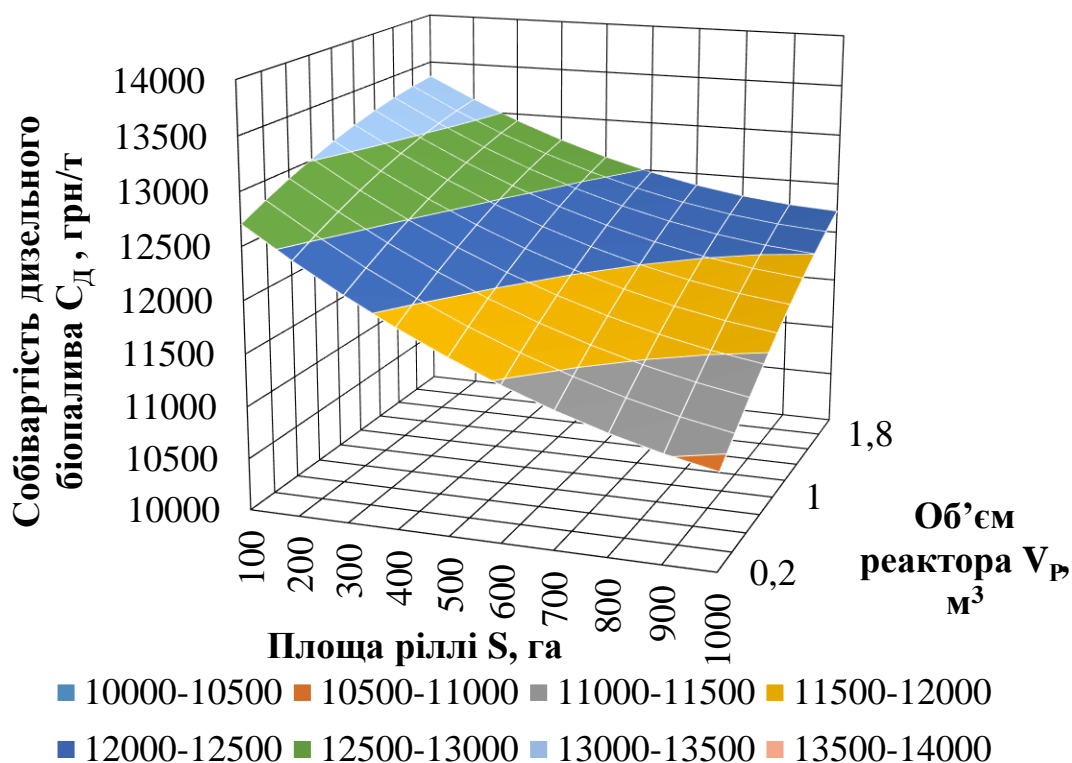


Рис. 5.7. Залежність собівартості дизельного біопалива C_D від площі ріллі S та об'єму реактора V_P

Приймаючи, ринкову вартість дизельного пального $B_{pd}=16000$ грн/т, річний прибуток становитиме від $\Pi_D=165$ грн/га до $\Pi_D=206$ грн/га, відповідно для підприємств із $S=100$ га та $S=1000$ га. Рівень рентабельності виробництва дизельного пального складе від $P_D=16,9$ % до $P_D=22,0$ %.

5.4. Удосконалена модель агроєкосистеми з виробництвом біопалив та її оцінка

На основі проведеного обґрунтування механіко-технологічних основ формалізації агроєкосистем та їх елементів розроблено комп'ютерну імітаційна модель функціонування агроєкосистеми із виробництвом біопалива, яка дала змогу встановити основні показники ефективності виробництва у сільськогосподарському підприємстві.

Імітаційна модель функціонування сільськогосподарського виробництва (рис. 5.8) включає в себе сівозміну на 300 га ріллі із вирощуванням основних сільськогосподарських культур, таких як озима пшениця 50 га, кукурудзу на силос 25 га і зерно 25 га, озимий ріпак 25 га, ячмінь 50 га, цукрові буряки 50 га та багаторічні трави 50 га.

Модель передбачає виробництво м'яса ВРХ, свиней, курей та риби, молока, яєць, олії, цукру та меду, вирощування грибів (гливи та печериць) і виробництво компосту.

Крім того, запропонована модель передбачає виробництво дизельного біопалива і біоетанолу в кількості необхідній для забезпечення роботи мобільної техніки, біогазу (отримання електроенергії та тепла), спалювання рулонів та січки соломи (отримання тепла та електроенергії).

Було проведено аналіз функціонування трьох варіантів агроєкосистеми: із виробництвом біопалива; без виробництва біопалива; - без тваринництва, птахівництва та рибництва.

Провівши аналіз параметрів функціонування агроєкосистеми, отриманих в результаті моделювання, побудовано графічні залежності балансу гумусу (рис. 5.9) в залежності від урожайності базової культури – озимої пшениці.

Аналіз графіка, дозволяє зробити висновок, що найкращі показники щодо балансу гумусу досягаються в агроєкосистемі без виробництва біопалива. Однак, в агроєкосистемі із виробництвом біопалива при урожайності зернових більше 30 га, також досягається позитивний баланс гумусу, а в агроєкосистемі без тваринництва досягнути позитивного балансу гумусу фактично неможливо.

Відносно економічної ефективності виробництва, слід зауважити що найбільший прибуток на гектар досягається в агроєкосистемі із виробництвом біопалива (рис. 5.10).

Із графіка на рисунку 5.10. походить, що найбільший економічний ефект можливо отримати в збалансованій агроєкосистемі, яка поєднує рослинництво, тваринництво і виробництво біопалива, забезпечивши при цьому бездефіцитний баланс гумусу. Так при урожайності озимої пшениці 30 ц/га прибуток для збалансованої агроєкосистеми із виробництвом біопалива становитиме 2360 грн/га, що вище на 51,6% ніж для агроєкосистеми без виробництва біопалива.

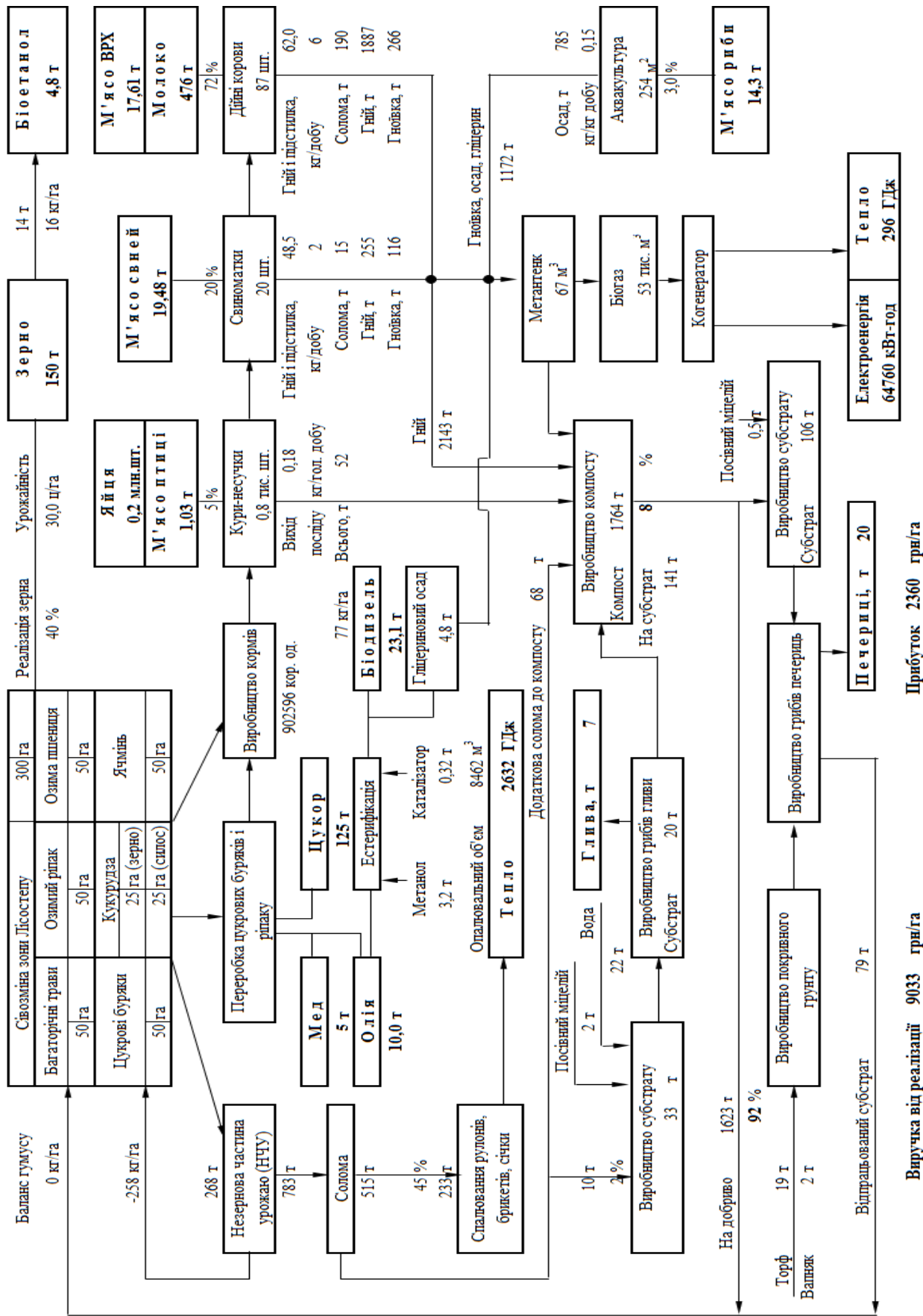


Рис. 5.8. Схема біологічної та енергетичної конверсії органічної сировини

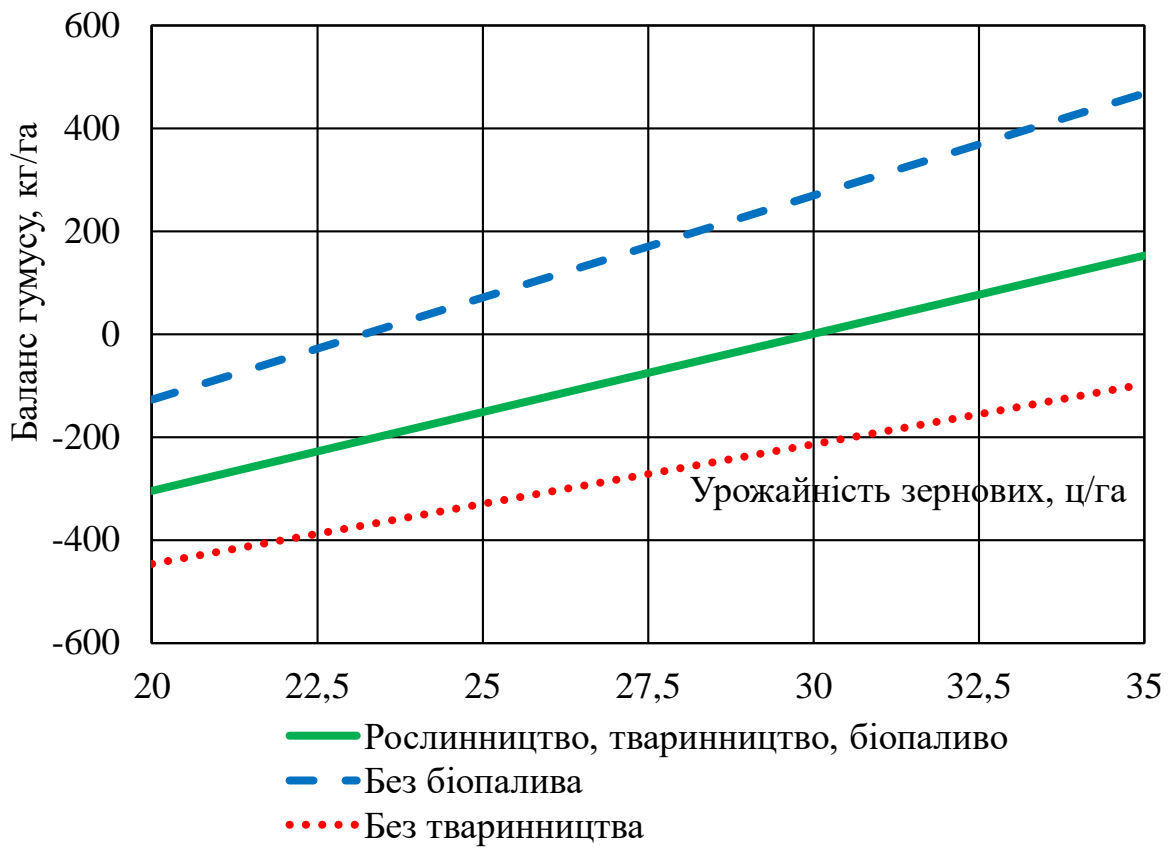


Рис. 5.9. Залежність балансу гумусу від урожайності базової культури

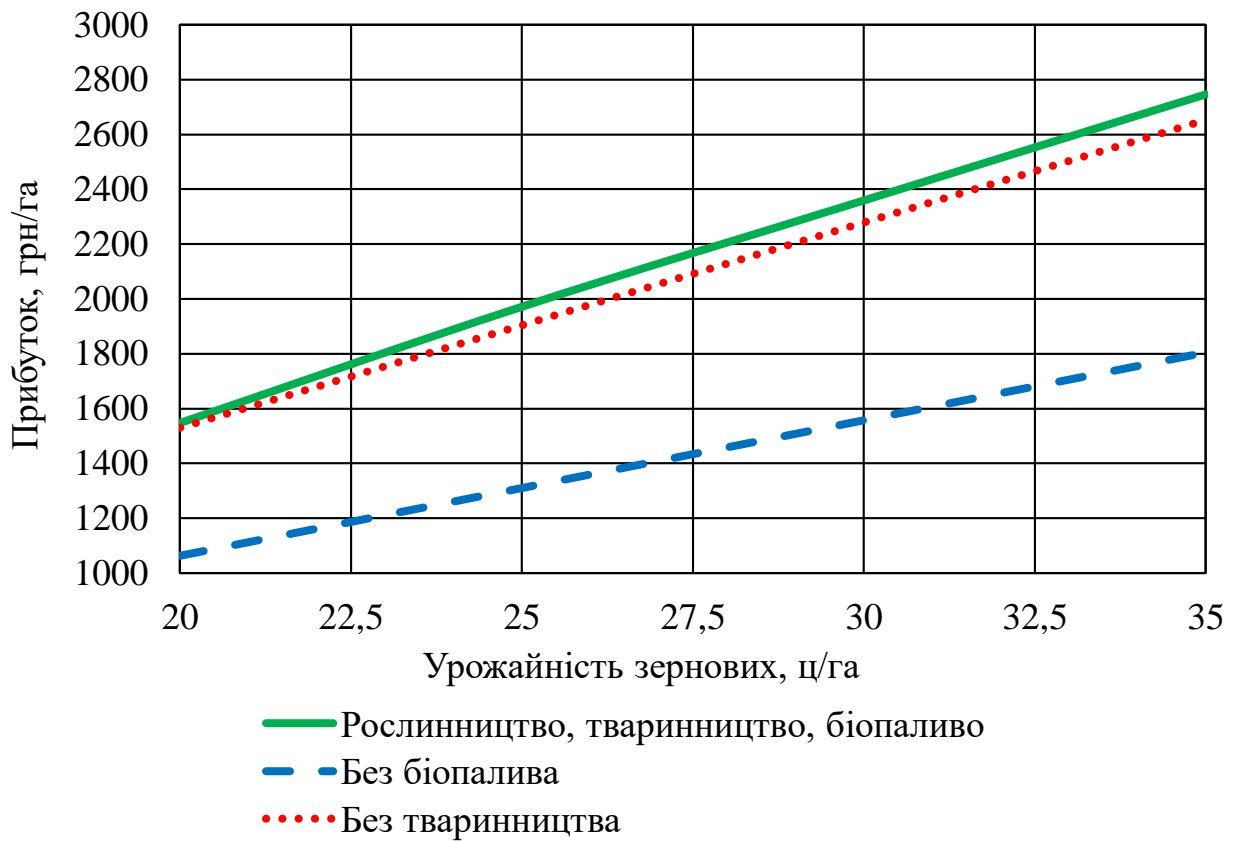


Рис. 5.10. Залежність прибутку від урожайності базової культури

Рівень забезпечення електроенергією та тепловою енергією можна виразити графічно (рис. 5.11) та залежностями:

$$PE=27,905\ln(u_3)-77,951, \quad (5.35)$$

та

$$TE=196,59\ln(u_3)-485,68, \quad (5.36)$$

де PE – рівень забезпечення електричною енергією, %; TE – рівень забезпечення тепловою енергією, %; u_3 – урожайність базової культури (озимої пшениці), ц/га.

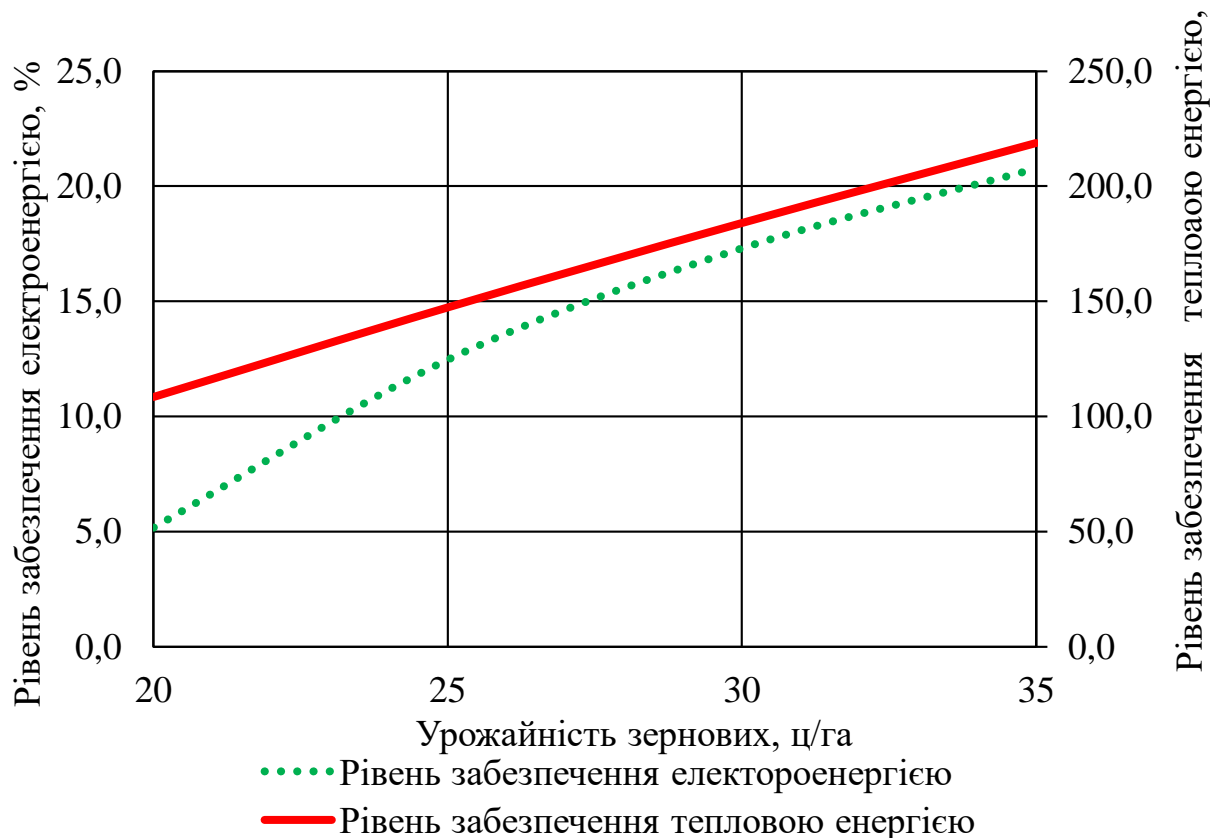


Рис. 5.11. Рівень забезпечення тепловою та електричною енергією (без конвертації надлишку теплової енергії в електроенергію)

З аналізу графіка на рис. 5.11 походить, що сільськогосподарське виробництво здатне себе забезпечити необхідною тепловою енергією при урожайності зернових 20 ц/га і вище, а при більшій урожайності надлишок теплової енергії можливо конвертувати в електричну, підвищивши і рівень забезпечення електричною енергією.

Структуру фінансових надходжень при функціонуванні агроєкосистеми розробленої на основі імітаційної моделі можна представити у вигляді діаграми (рис. 5.12).

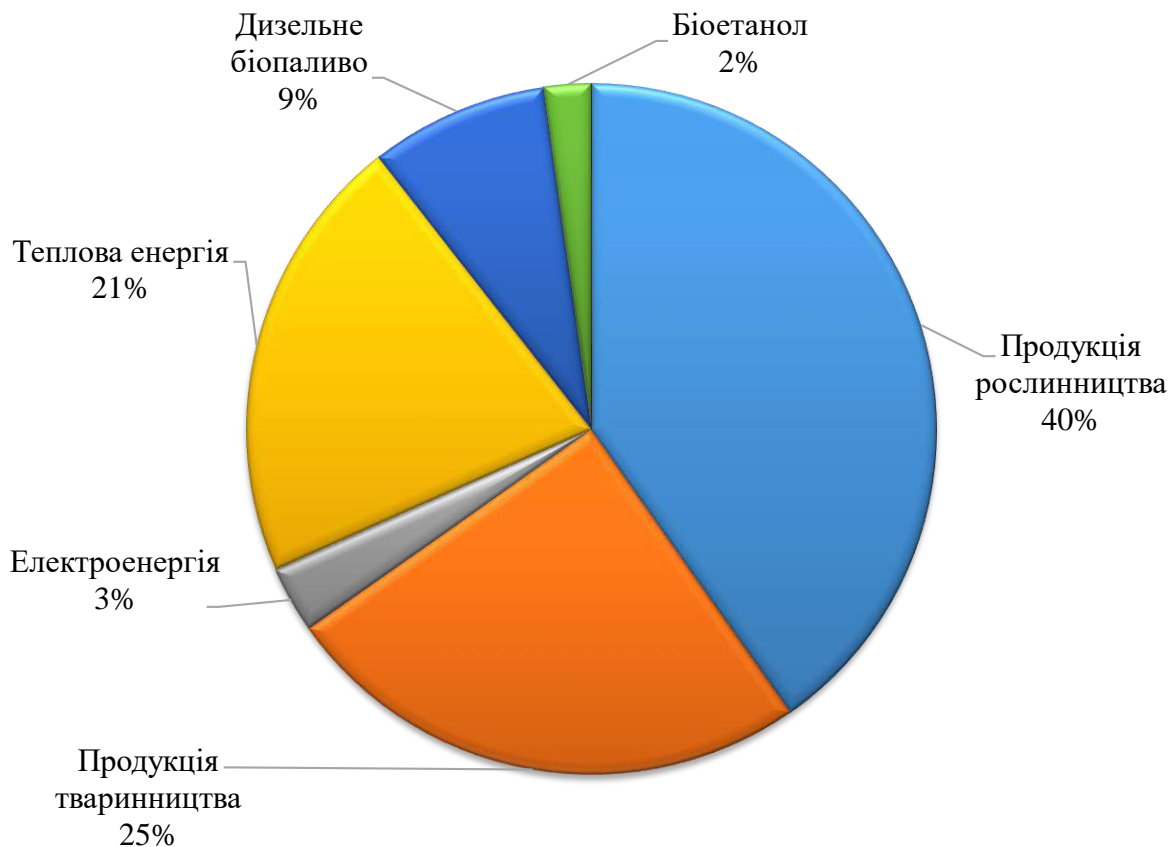


Рис. 5.12. Структура фінансових надходжень агроєкосистеми

З графіка на рис. 5.12 походить, що за рахунок виробництва і використання біопалива можна на 35 % збільшити фінансові надходження сільськогосподарських підприємств.

5.5. Висновки до розділу 5

1. Визначено, що вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора для підприємств із зерно-молочною спеціалізацією складає від $0,72 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $0,81 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу, а собівартість виробленої на його основі електроенергії із використанням біогазових реакторів обертового типу становить від $0,44 \text{ грн/кВт год}$ до $0,85 \text{ грн/кВт год}$; для підприємств із зерно-свинарською спеціалізацією відповідно від $0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $1,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу та від $0,38 \text{ грн/кВт год}$ до $0,85 \text{ грн/кВт год}$; для підприємств із зерно-птахівничою спеціалізацією – від $1,18 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $1,34 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу та від $0,30 \text{ грн/кВт год}$ до $0,72 \text{ грн/кВт год}$. Причому, менші значення виходу біометану та вищі значення собівартості електроенергії будуть мати місце при площі ріллі 100 га, а менші – при площі ріллі 1000 га.

2. Проведене техніко-економічне обґрунтування ефективності використання котлів із верхнім горінням дозволило встановити, що питомі витрати отримання тепла складають для котлів, які працюють на рулонах соломи RAU2-600M (теплова потужність $P_k=860 \text{ кВт}$) – $57,9 \text{ грн/ГДж}$ та RAU2-331M ($P_k=300 \text{ кВт}$) – $82,3 \text{ грн/ГДж}$; для котла, що працює на природному газу КВГ-200

($P_k=200$ кВт) – 130,0 грн/ГДж (базовий варіант). Для котла із верхнім горінням, який працює на січці соломи КВГ-20 ($P_k=20$ кВт) – 75,8 грн/ГДж; а для 2-х котлів із верхнім горінням КВГ-200, що працюють на рулонах ($P_k=200$ кВт) – 51,5 грн/ГДж. Ефективність пропонуваніх котлів із верхнім горінням на 61 % вища ніж у котлів, що працюють на природному газу (за рахунок використання дешевшого палива) та на 11 % вище ніж у традиційних котлів, які працюють на соломі (за рахунок підвищення ефективності спалювання палива).

3. Визначено, що собівартість виробництва дизельного біопалива складе від $C_d=12172$ грн/тону (для модельного підприємства із площею ріллі $S=1000$ га і реактора змішувача-розділювача ЦРПР-2 об'ємом $V_p=2$ м³) до $C_d=12886,7$ грн/тону ($S=100$ га, ЦРПР-0,4 $V_p=0,4$ м³). При розрахунках собівартості прийнято вартість олії $B_{ол}=9700$ грн/т, а вартість метилату калію $B_{mk}=11000$ грн/т. Приймаючи, ринкову вартість дизельного пального $V_{рд}=16000$ грн/т, річний прибуток становитиме від $ПД=165$ грн/га до $ПД=206$ грн/га, відповідно для підприємств із $S=100$ га та $S=1000$ га, рівень рентабельності виробництва дизельного біопального складе від $РД=16,9$ % до $РД=22,0$ %.

4. Встановлено, що найбільший економічний ефект можливо отримати в збалансованій агроєкосистемі, що поєднує рослинництво, тваринництво і виробництво біопалива, забезпечивши при цьому бездефіцитний баланс гумусу. При урожайності озимої пшениці 30 ц/га прибуток для збалансованої агроєкосистеми із виробництвом біопалива становитиме 2360 грн/га, що вище на 51,6 % ніж для агроєкосистеми без виробництва біопалива. До 35 % всіх фінансових надходжень в сільськогосподарському виробництві можливо забезпечити за рахунок виробництва і використання біопалива.

ВИСНОВКИ

У монографії наведено теоретичне обґрунтування та вирішення наукової проблеми підвищення рівня енергетичної автономності агроєкосистем за одночасного підтримання родючості ґрунтів завдяки формалізації механіко-технологічних параметрів технічних засобів для агропромислового отримання газоподібного, рідкого та твердого біопалива.

1. Отримано математичну модель, яка характеризує взаємозв'язок між геометричними і кінематичними параметрами метантенка та технологічними параметрами процесу виробництва біометану із витратами енергії та рівномірністю перемішування субстрату. Розроблена модель свідчить, що збільшення внутрішнього радіуса біогазового реактора від 0,5 до 2,15 м обумовлює зміну коефіцієнта заповнення обертового метантенка від 0,89 до 0,946. При цьому завдяки узгодженню динаміки зміни потужностей на перемішування біомаси та подолання опору підшипників забезпечується мінімальна питома потужність, що витрачається на обертання метантенка, у межах від 99,85 до 101,23 Вт/м³. Рівномірне перемішування органічного та мінерального прошарків субстрату забезпечується за раціональних значень кутової швидкості метантенка від 0,035 до 0,08 с⁻¹ та довжини лопаток метантенка від 77,5 до 82,5 % до його внутрішнього радіуса.

2. Розроблено математичну модель надходження повітря до зони газифікації та згорання котла із верхнім горінням, що пов'язує теплову потужність із аеродинамічним опором розподільника повітря, витратами повітря через нього та його геометричними параметрами. Встановлено, що витрати повітря при спалюванні соломи на 1 кВт теплової потужності котла становлять від $3,53 \cdot 10^{-4}$ до $3,69 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Надходження повітря у котел для утворення генераторного газу становить від 22,4 до 31,6 % та на спалювання газу від 77,6 до 68,4 % від загального об'єму повітря. Для забезпечення рівномірного розподілу повітря у зоні утворення генераторного газу максимальний розмір отворів розподільника має перебувати у межах від 13 до 26 мм і зменшуватись із фіксованим кроком від 0,3 до 0,7 мм.

3. Отримано математичну модель для визначення енергетичних витрат на турбулентне перемішування емульсії у циркуляційних змішувачах у ході виробництва дизельного біопалива залежно від геометричних та технологічних параметрів змішувача. Встановлено, що турбулентний режим у струмені емульсії забезпечується при тиску від 0,01 до 0,05 МПа та діаметрі сопла форсунок змішувача від 10 до 35 мм.

4. Експериментально отримано рівняння регресії, що пов'язують потужність, що витрачається на обертання метантенка із геометричними і кінематичними параметрами метантенка та технологічними параметрами процесу виробництва біометану, що виражені через коефіцієнти заповнення та занурення. Встановлено, що заповнений на величину від 94 до 95 % обертовий метантенк з об'ємом завантаження біомаси від 3 до 103 м³ потребує мінімальної потужності для приводу від 299 Вт до 10,4 кВт при його зануренні у рідину на величину від 95 до 97 %. При цьому питома потужність приводного механізму у

розрахунку на об'єм біомаси в реакторі перебуватиме у межах, що встановлені теоретично.

5. На основі експериментальних даних отримано рівняння регресії, яке пов'язує витрати повітря у топці котла із його ефективністю, що виражена дійсною тепловою потужністю та вмістом СО у димових газах котла. Встановлено, що для досліджуваного котла КГВ-20 із теоретичною тепловою потужністю 20 кВт, питомий вміст СО набуває мінімальних значень на рівні 216 мг/м³ при загальній подачі повітря до топки котла 0,0071 м³/с, що на 4 % нижче ніж встановлено теоретично, у цьому разі котел розвиває максимальну дійсну теплову потужність 16,6 кВт із ККД 82,8 %.

6. Експериментально отримано рівняння регресії, що пов'язує енергетичні витрати на перемішування емульсії у циркуляційних змішувачах із параметрами форсунок та насосної станції. Встановлено, що у діапазоні обертів гідронасоса НШ-100 від 800 до 1400 об/хв споживана потужність незначно знижується при зміні діаметра сопла форсунки у межах від 9 до 30 мм, а у діапазоні від 200 до 800 об/хв та при зміні діаметра сопла форсунки потужність залишається сталою. Мінімальні енерговитрати при перемішуванні та циркуляції емульсії досягаються на рівні 65 Вт за частоти 400 об/хв гідронасоса НШ-100, у цьому разі забезпечується достатня інтенсивність перемішування емульсії.

7. За результатами економічного обґрунтування елементів удосконаленої агроєкосистеми встановлено, що найбільший економічний ефект можливо отримати у збалансованій агроєкосистемі, яка поєднує рослинництво, тваринництво і виробництво біопалива, забезпечивши при цьому бездефіцитний баланс гумусу. За урожайності озимої пшениці 30 ц/га прибуток для такої агроєкосистеми становитиме 2360 грн/га, що вище на 51,6 % ніж для агроєкосистеми без виробництва біопалива, у цьому разі до 35 % всіх фінансових надходжень у сільськогосподарському виробництві забезпечується завдяки виробництву і використанню біопалива.

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

Встановлено доцільність використання розроблених технологічних процесів та обладнання для виробництва біометану на основі обертових метантенків, спалювання соломи у котлах із верхнім горінням та виробництва дизельного біопалива на основі циркуляційний змішувачів, що дає змогу в агроєкосистемі, яка складається із блоків виробництва продукції рослинництва, тваринництва, птахівництва, аквакультури, грибівництва, блоку виробництва органічних добрив на основі соломи, гною і посліду для забезпечення балансу гумусу та блоку виробництва біопалива, за урожайності озимої пшениці до 30 ц/га отримати рівень забезпечення електроенергією до 17,3 % і повністю забезпечити потреби у тепловій енергії та рідкому біопаливі. Розроблено рекомендації щодо виробництва біометану, дизельного біопалива та використання соломи зернових, як енергоресурсу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична оцінка агроєкосистем : навч. посіб. / О. Ф. Смаглій, А. С. Малиновський, А. Т. Кардашов [та ін.] ; за ред. О. Ф. Смаглія. – Житомир : ДАУ, 2002. – 160 с.
2. Голуб Г. А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроєкосистеми / Г. А. Голуб // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2010. – Вип. 144, ч. 4. – С. 303–312.
3. Голуб Г. А. Техніко-технологическое обеспечение энергетической автономности агроэкоцистем / Г. А. Голуб // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Международ. науч.-практ. конф., 19-20 окт. 2010 г. : в 2 т. – Минск, 2010. – Т. 1 – С. 24–29.
4. Голуб Г. А. Науково-технічні та економічні проблеми виробництва і використання біопалив у агроєкосистемах / Г. А. Голуб // Вісн. Сумського нац. аграр. ун-ту. Сер. Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2010. – Вип. 1 (21). – С. 72–80.
5. Голуб Г. А. Проблеми техніко-технологічного забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем / Г. А. Голуб // Збірник наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. Сер. Технічні науки. – 2011. – Вип. 7. – С. 59–66.
6. Концептуальные аспекты комплексного технического обеспечения экологически безопасного производства органических продуктов / В. А. Дубровин, М. Д. Мельничук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Международ. науч.-техн. конф., 19-20 окт. 2011 г. : в 3 т. – Минск : НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва, 2011. – Т. 1. – С. 50–57.
7. Развитие биоэнергетики в Украине / В. А. Дубровин, Г. А. Голуб, С. В. Драгнев, П. Евич // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings, 25-28th June 2013 / Industrial Institute of Agricultural Engineering. – Poznan : Puszczukowo, 2013. – P. 41–47.
8. Golub G. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems / G. Golub, S. Kukharets, O. Marus // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings, 25-28th June 2013 / Industrial Institute of Agricultural Engineering. – Poznan : Puszczukowo, 2013. – P. 59–65.
9. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems [Електронний ресурс] / [G. Golub, V. Dubrovin, S. Kukharets et al.] // Біоресурси планети і якість життя : міжнар. електрон. журн. – 2013. – Вип. 4. – Режим доступу: <http://gchera-ejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/article/view/146/112>.
10. Сільське господарство України : стат. збірник за 2008 рік / за ред. Ю. М. Остапчука ; Держ. ком. статистики України. – К., 2009. – 370 с.
11. Сільське господарство України : стат. збірник за 2013 рік / за ред. Н. С. Власенко ; Держ. ком. статистики України. – К., 2014. – 400 с.

12. Виробництво і використання біогазу в Україні / [Юрген Кооп, Жанет Хохі, Дженіфер Фултон, Хенрік Персонн]. – К. : Рада з питань біогазу Biogasrat.- 2012. – 74 с.
13. Перспективи производства биогаза в Украине / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев, Т. В. Ходаковская // Возобновляемая энергетика. – 2011. – № 3. – С. 73–77.
14. Гелетуха Г. Г. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев // Аналітична записка БАУ. – 2013. – № 4. – 22 с.
15. Гелетуха Г. Г. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна // Аналітична записка БАУ. – 2014. – №7. – 33 с.
16. Екологічні проблеми землеробства / за ред. І. Д. Примака. – К. : Центр учбової л-ри, 2010. – 456 с.
17. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany // Applied Energy. – 2014. – Vol. 114. – P. 749–762.
18. Ключ С. В. Визначення частки соломи та рослинних відходів для енергетичного використання / С. В. Ключ // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 4. – С. 82–85.
19. Кухарець В. В. Оцінка енергетичного потенціалу соломи / В. В. Кухарець // Наук. вісн. НАУ. – 2008. – Вип. 125. – С. 273–276.
20. Баланс гумусу і поживних речовин у ґрунтах України / А. С. Заришняк, С. А. Балюк, М. В. Лісовий, А. В. Комариста // Вісн. аграр. науки. – 2012. – № 1. – С. 28–32.
21. Таргоня В. Методологічні основи конструювання адаптивних агробіоінженерних систем / В. Таргоня // Збірник наук. пр. ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2014. – Вип. 18 (32), кн. 2. – С. 14–32.
22. Mason J. Sustainable agriculture/ John Mason. – 2th ed. – Landlinks Press, 2003. – 212 p.
23. Голуб Г. А. Критерії оптимізації параметрів машин та обладнання / Г. А. Голуб // Вісн. Львівського нац. аграр. ун-ту. Сер. Агроінженерні дослідження. – 2008. – № 12. – С. 17–24.
24. Погорельый Л. В. Испытания сельскохозяйственной техники: научно-методические основы оценки и прогнозирования надежности сельскохозяйственных машин / Л. В. Погорельый, В. Я. Анилович. – К. : Феникс, 2004. – 208 с.
25. Писаренко В. Н. Перспективы экологической конверсии сельскохозяйственного производства [Электронный ресурс] / В. Н. Писаренко, П. В. Писаренко, В. В. Писаренко. – Режим доступа: http://www.agromage.com/stat_id.php?id=574.
26. Безвідходне виробництво зернових культур в системі АПК : наук.-метод. рекомендації щодо продовольчого та енергетичного використання сільськогосподарської сировини / [Кухарець В. В., Іванюта С. М., Кузубов М. В. та ін.]. – К. : НУБіП, 2009. – 63 с.

27. Черевко Г. В. Економіка природокористування / Г. В. Черевко, М. І. Яцків. – Львів : Світ, 1995. – 208 с.
28. Комплексні технологічні та природоохоронні заходи при реалізації чистого виробництва біопалив для АПК : наук.-метод. рекомендації для агропромислових підприємств України / [Дубровін В. О., Мельничук М. Д., Гринько П. В. та ін.]. – К. : НУБіП України, 2011. – 52 с.
29. Інтегральні ресурсозберігаючі технології виробництва високоліквідної натуральної рослинної сировини, її переробки і зберігання на основі адаптивних агробіоінженерних систем : наук.-метод. рекомендації для агропромислових підприємств України / [Дубровін В. О., Мельничук М. Д., Григорович О. І. та ін.]. – К. : НУБіП, 2014. – 60 с.
30. Про альтернативні джерела енергії : закон України від 20.02.2003 р. № 555-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2003. – № 24. – Ст. 155.
31. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / С. О. Кудря. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
32. Кудря С. О. Використання енергії відновлюваних джерел в агропромисловому комплексі України / С. О. Кудря, В. М. Головка, Л. В. Яценко // Наук. вісн. НУБіП. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2010. – Вип. 153. – С. 19–23.
33. Бородіна О. Перспективи для сільського господарства України / О. Бородіна, М. Шевчишин // Пропозиція. – 2008. – № 10. – С. 90–94.
34. Кухарець С. М. Обеспечение рационального использования сырья для получения биотоплив в агропромышленном комплексе / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, С. В. Драгнев // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 69–76.
35. Кухарець С. М. Обґрунтування механіко-технологічних основ конструювання агрооексitem / С. М. Кухарець, Б. А. Шелученко // Збірник наук. пр. Подільського агротехнолог. ун-ту. – 2013. – Спец. вип. до VIII наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – С. 164–171.
36. Альтернативна енергетика : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / [Мельничук М. Д., Дубровін В. О., Мироненко В. Г. та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.
37. Жовнір М. Солома обігріє села / М. Жовнір, Є. Олійник, С. Чаплигін // Агросектор. – 2007. – № 5. – С. 28–31.
38. Гелетуха Г. Г. Перспективи виробництва теплової енергії з біомаси в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, Є. М. Олійник // Промислова теплотехніка. – 2013. – Т. 35, № 5. – С. 48–57.
39. Перспективи виробництва електричної енергії з біомаси в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, Є. М. Олійник, А. І. Гелетуха // Промислова теплотехніка. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 67–75.
40. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, П. П. Кучерук, Є. М. Олійник // Аналітична записка БАУ. – 2014. – № 9. – 32 с.

41. Енергоавтономність виробництва на основі біологічних видів палива [М. В. Молодик, Г. А. Голуб, В. О. Лук'янець та ін.] // Вісник аграрної науки. – 2008. – № 11. – С. 39–44.
42. Кухарець С. М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Вісн. Житомир. нац. агроєколог. ун-ту. – 2012. – № 1, т. 1. – С. 345–352.
43. Кухарець С. М. Енергоавтономність агроєкосистем на основі біологічних видів палива / С. М. Кухарець // Збірник наукових праць Подільського агротехнолог. ун-ту. – 2012. – Спец. вип. до VII наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – С. 149–154.
44. Науково-технічні та економічні особливості виробництва і використання біопалив у агроєкосистемах / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, І. В. Нездвезька, О. В. Коновалов // Вісн. Житомир. нац. агроєколог. ун-ту. – 2012. – № 2, т. 1. – С. 187–195.
45. Кухарець С. М. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Сільськогосподарські машини. – 2013. – Вип. 24. – С. 187–194.
46. Golub G. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems / Golub G., Kukharets S., Marus O. // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings, 25-28th June 2013 / Industrial Institute of Agricultural Engineering. – Poznan : Puszczkowo, 2013. – P. 59–65.
47. Dubrovin V. Energy analysis of solid biofuels production from agro biomass / Dubrovin V., Drahnev S., Kukharet S. // Second International Conference on Natural and Antropic risks IGNAR. – Bacau (Romania), 2014. – P. 183.
48. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець та ін.]; за ред. Г. А. Голуба. – К. : НУБіП України, 2014. – 106 с.
49. Василенко П. М. О методике механико-математических изысканий при разработке проблем сельскохозяйственной техники / П. М. Василенко. – М.: БТИ ГОСНИТИ, 1962. – 231 с.
50. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / [В. О. Дубровін, Л. Д. Романчук, С. М. Кухарець та ін. ; відп. ред. Скидан О. В.]. – К. : Центр учбової л-ри, 2014. – 335 с.
51. Jevic P. Technical standard for rapeseed oils as a fuel / P. Jevic, V. Dubrovin, E. Krasowski // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2012. – Vol. 14, No 3. – P. 4–9.
52. Кухарець С. М. Виробництво твердого біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва // С. М. Кухарець, В. В. Кухарець, О. О. Осадчий // Збірник наук. пр. Подільського держ. агроєколог. ун-ту. – 2011. – Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – С. 159–163.
53. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні / Г. Г. Гелетуша, Т. А. Железна, Б. Ю. Матвеев, М. М. Жовнір // Пром. теплотехніка. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 85–93.

54. Определение основных параметров камеры газификации газогенератора на сырье расительного происхождения / Н. Цивенкова, А. Голубенко, С. Кухарець, В. Шубенко // *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 112–120.
55. Обоснование рациональности использования продуктов газификации соломы в технологическом процессе сушки зерновых / С. Кухарець, В. Шубенко, А. Голубенко, Н. Цивенкова // *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 99–107.
56. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах аг-ропромислового виробництва [Голуб Г., Кухарець С., Шубенко В., Бовсунівська Н.] // *Техніка і технології АПК (Науково-виробничий журнал)*. – 2015. – № 2 (65). – С. 31-34.
57. Czudec A. Odnowialne zrodla energii jako element zrownowazonego rozwoju rolnictwa i obszarow wiejskich / Adam Czudec, Bogumila Grzebyk, Grzegorz Slusarz // *Uniwersytet rzeszowsky. Stowarzyszenie na rzecz Wspar cia Przemian w Polskim Rolnictwie “Klub Integracji z Wiejska Europa”*. – Rzeszow : Zaklad Polityki Gospodarczej I Agrobiznesu, 2006 – S. 54.
58. Драгнев С. В. Технологічні аспекти виробництва біодизельного пального / С. В. Драгнев, С. М. Кухарець, С. П. Боровський // *Збірник наук. пр. Подільського держ. агроеколог. ун-ту*. – 2011. – Спец. вип. до VI наук.-практ. конф. «Сучасні проблеми збалансованого прирокористування». – С.155–159.
59. Basic principles of biofuel use in Ukrainian agroecosystems / Golub G., Dubrovin V., Pavlenko M, Chuba. V. // *Book of Abstracts: Second International conference on natural and anthropic risks ICNAR, 4-7 June 2014*. – Bacau (Romania): Alma Mater Bacau, 2014. – P. 186.
60. Голуб Г. Оценка сырьевой базы производства дизельного биотоплива при двухступенчатом отжиге растительного масла / Г. Голуб, М. Павленко, Н. Оларь // *MOTROL: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture / An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery*. – 2014. – Vol. 16, № 3. – P. 26–32.
61. Агроекологія : навч. посіб. / [О. Ф.Смаглій, А. Т. Кардашов, П. В. Литвак та ін.]. – К. : Урожай, 2004. – 644 с.
62. Інженерна екологія. Ч. 7. Фізична екологія : навч. посіб. / [Б. А. Шелудченко, М. І. Бахмат, І. А. Шелудченко та ін.] ; за ред. Б. А. Шелудченко. – Кам’янець-Подільський : ПДАТУ, 2008. – 124 с.
63. Шелудченко Б. А. Методологія досліджень екосистеми / Б. А. Шелудченко. – Кам’янець-Подільський : ПДАТУ, 2008 – 110 с.
64. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 406 с.
65. Казанцев Э. Ф. Технологии исследования биосистем / Э. Ф. Казанцев. – М. : Машиностроение, 1999. – 177 с.
66. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс : пер. с англ / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1988. – 128 с.
67. Веведин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В. В. Веведин. – М. : Наука, 1986. – 296 с.

68. Василенко П. М. О методике механико-математических изысканий при разработке проблем сельскохозяйственной техники / П. М. Василенко. – М.: БТИ ГОСНИТИ, 1962. – 231 с.
69. Шелудченко Б. А. Вступ до конструювання природно-техногенних геоекосистем / Б. А. Шелудченко. – Кам'янець-Подільський : ПДАТУ, 2014. – 170 с.
70. Кухарець С. М. Механіко-технологічний підхід до конструювання агроекосистеми / С. М. Кухарець // Вісн. Житомирського нац. агрокол. ун-ту. – 2014. – № 1, т. 1(39). – С.187–197.
71. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Гради Буч, Роберт А. Максимчук, Майкл У. Энгл [и др.]. – М. : Вильямс, 2008. – 720 с.
72. Armstrong Deborah J. The Quarks of Object-Oriented Development / Armstrong Deborah J. // Communications of the ACM. – 2006. – Vol. 49. – С. 123–128.
73. Сонько С. П. Агроекосистема як екологічна ніша людини / С. П. Сонько // Зб. наук. пр. Уманського ДАУ. Сер. Агрономія. – 2009. – Вип. 71, ч. 1. – С. 188–199.
74. Голуб Г. А. Критерії оптимізації параметрів машин та обладнання / Г. А. Голуб // Вісн. Львівського нац. аграр. ун-ту. Сер. Агроінженерні дослідження. – 2008. – № 12 (2). – С. 17–24.
75. Лур'є А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. Б. Лурье. – Л. : Колос, 1970. – 376 с.
76. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М. : Изд-во лит. по строительству, 1971. – 368 с.
77. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
78. Кухарець С. М. Вплив конструктивно-технологічних параметрів складових вакуумної системи на стабільність режимних характеристик мобільної доільної установки / С. М. Кухарець, О. Ю. Романишин, О. В. Медведський // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 2 (45), т. 4, ч. 1. – С. 290–298.
79. Моделювання параметрів роботи ротаційних робочих органів ґрунтообробних знарядь / С. М. Кухарець, Ю. Б. Бродський, С. В. Бушма, В. В. Кухарець // Вісн. Держ. агрокол. ун-ту. – 2006. – № 2. – С. 224–232.
80. Формалізація параметрів ІЧ-сушильних установок імпульсної дії при моделюванні технологічних процесів сушіння / І. В. Нездвєцька [та ін.] // Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. – 2012. – № 1. – С. 47–52.
81. Нездвєцька І. В. Оптимізація сушіння коренів цикорію / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець, О. Д. Муляр // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2010. – № 1. – С. 319–325.
82. Нездвєцька І. В. Використання методів нечіткого моделювання при проектуванні сушильного обладнання / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 170, ч. 1. – С. 378–383.

83. Дубровін В. О. Обґрунтування раціональних параметрів колісних рушіїв МТА для застосування в умовах зони Полісся України / В. О. Дубровін, С. М. Кухарець, В. Р. Білецький // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту. – 2007. – Вип. 107. – С. 328–333.
84. Рудько Г. І. Конструктивна геоєкологія: наукові основи та практичне втілення / Г. І. Рудько, О. М. Адаменко ; за ред. Г. І. Рудька. – К. : ТОВ «Маклаукт», 2008. – 320 с.
85. Рудько Г. І. Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин : монографія / Г. І. Рудько, М. М. Курило, С. В. Радованов. – К. : АДЕФ-Україна, 2011. – 384 с.
86. Рудько Г. І. Землелогія. Еколого-ресурсна безпека землі / Г. І. Рудько, О. М. Адаменко ; за ред. Г. І. Рудька. – К. : Академпрес, 2009. – 512 с.
87. Dubrovin V. Prolog to the development of biodiesel (farme) in Ukraine / V. Dubrovin, P. Jevic, Z. Shediva // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2004. Vol. 49. No 2. – P. 14-16.
88. Кухарець С. М. Алгоритм розподілу органічних ресурсів у агроєкосистемах / С. М. Кухарець // Зб. наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2012. – Вип. 10, т. 1. – С. 61–66.
89. Біопалива : Технології, машини, обладнання / [В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло та ін.]. – К. : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.
90. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития / [Л. С. Орсик, Н. Т. Сорокин, В. Ф. Федоренко и др.]. - М. : ФГИУ "Росинформ агротех", 2008. - 404 с.
91. Стребков Д. С. Сценарии развития глобальной энергетики в контексте широкомасштабного использования возобновляемых источников энергии / Д. С. Стребков, В. В. Харченко // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2014. - Вип. 194(1). - С. 8-16.
92. Адаменко О. М. Екологічне картування / Адаменко О. М., Рудько Г. І., Консевич Л. М. – Івано-Франківськ : Полум'я. 2003. – 580 с.
93. Адаменко О. М. Наш майбутній дім – Екоєвропа. Роман життя, науки і кохання : в 4-х т. / О. М. Адаменко. – Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2007. – Т. 4. – 428 с.
94. Сівозміни у землеробстві України / за ред. В. Ф. Сайка, П. І. Бойка. – К. : Аграрна наука, 2002. – 147 с.
95. Основи землеробства : підручник / [О. Ф. Смаглій, М. Ф. Рибак, Є. М. Данкевич та ін.]; за ред. О. Ф. Смаглія. – Житомир : Держ. агроєкол. ун-т, 2008. – 514 с.
96. Сарана В. В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини / В. В. Сарана, С. М. Кухарець, М. М. Гудзенко // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2010. – Вип. 144, ч. 3. – С.190–197.

97. Калетник Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні : монографія / Г. М. Калетник. – К. : Аграр. наука, 2008. – 464 с.
98. Калетник Г. М. Формування ринку біосировини для виробництва біопалива / Г. М. Калетник // Вісн. аграр. науки. – 2008. – № 7. – С. 64–66.
99. Кукибный А. А. Метательные машины / А. А. Кукибный. – М. : Машиностроение, 1964. – 196 с.
100. Голуб Г. А. Проблеми використання соломи в якості палива / Г. А. Голуб // Вісник аграрної науки. – 2010. – № 8. – С. 49–52.
101. Одум Ю. Основы экологии : пер. с англ. / Ю. Одум. – М. : Мир, 1975. – 740 с.
102. Одум Г. Энергетический базис человека и природы / Г. Одум, Э. Одум ; пер. с англ. под ред. А. П. Огурцова. – М. : Прогресс, 1978. – 380 с.
103. Булаткин Г. А. Энергетическая эффективность земледелия и агроэкосистем: взаимосвязи и противоречия / Г. А. Булаткин, В. В. Ларионов // Агрохимия. – 1997. – № 3. – С. 63–66.
104. Шидула М. К. Вирощування екологічно безпечної продукції рослинництва в ґрунтозахисному землеробстві / М. К. Шидула // Відтворення родючості ґрунтів в ґрунтозахисному землеробстві / за ред. М. К. Шидули. – К. : Оранта, 1998. – С. 453–459.
105. Ґрунтозахисна біологічна система землеробства в Україні : монографія / [М. К. Шидула, С. С. Антонєць, А. Д. Балаєв та ін.] ; за ред. М. К. Шидули. – К. : Оранта, 2000. – 389 с.
106. Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві : монографія / [М.К. Шидула, С.С. Антонєць, В.О. Андрієнко та ін.] ; за ред. М. К. Шидули. – К. : Оранта, 1998. – 680 с.
107. Біохімічний механізм відтворення гумусу і саморегуляції ґрунтової родючості / М. К. Шидула, Д. О. Мельничук, Н. М. Рідей, С. П. Роговський // Відтворення родючості ґрунтів в ґрунтозахисному землеробстві / за ред. М. К. Шидули. – К. : Оранта, 1998. – С. 453–459.
108. Кухарець С. М. Результати комп'ютерного аналізу параметрів роботи ротацийних робочих органів / С.М. Кухарець // Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2006. – Вип.95 (Частина II). – С. 222-230.
109. Голуб Г. А. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агро-еко системи / Г.А. Голуб, С.М. Кухарець // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Серія техніка та енергетика АПК. –2014. – Вип. 196, ч. 2. – С. 20–27.
110. Родючість ґрунтів: моніторинг та управління / [В. В. Медведєв, Г. Я. Чесняк, Т. М. Лактіонова та ін.] ; за ред. В. В. Медведєва. – К. : Урожай, 1992. – 248 с.
111. Як зберегти і підвищити родючість чорноземів / за ред. Б. С. Носка, Г. Я. Чесняка. – К. : Урожай, 1984. – 200 с.
112. Шеремет Л. Г. Заповідник «Михайлівська цілина» / Л. Г. Шеремет // Стан природного середовища та проблеми його охорони на Сумщині. – Суми : Джерело, 1999. – Кн. 3: Природно-заповідний фонд області. – С. 32–35.

113. Сільське господарство України : стат. зб. за 2008 рік / за ред. Ю. М. Остапчука ; Держ. ком. статистики України. – К., 2009. – 370 с.
114. Сільське господарство України : стат. зб. за 2013 рік / за ред. Н. С. Власенко ; Держ. ком. статистики України. – К., 2014. – 400 с.
115. Стан родючості ґрунтів України та прогноз його змін за умов сучасного землеробства / за ред. В. В. Медведєва, М. В. Лісового. – Х. : Штрих, 2001. – 100 с.
116. Медведев В. В. Мониторинг почв Украины. Концепция, предварительные результаты, задачи / В. В. Медведев. – Х. : ПФ Антикава, 2002. – 428 с.
117. Баканов В. Н. Кормление сельскохозяйственных животных / В. Н. Баканов, В. К. Менькин. – М. : Агропромиздат, 1989. – 511 с.
118. Богданов Г. А. Кормление сельскохозяйственных животных : учебник / Г. А. Богданов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1990. – 624 с.
119. Технологія виробництва продукції тваринництва : підручник / О. Т. Бусенко, В. Д. Столюк, М. В. Штомпель [та ін.] ; за ред. О. Т. Бусенка. – К. : Аграр. освіта, 2001. – 432 с.
120. Дубровин В. Сельхозпроизводство как источник энергии / В. Дубровин, М. Мельничук, В. Мироненко // *Зерно*. – 2006. – № 2. – С. 76–81.
121. Справочник зоотехника / [А. П. Калашников, О. К. Смирнов, Н. И. Стрекоза и др.] ; под ред. А. П. Калашникова, О. К. Смирнова. – М. : Агропромиздат, 1986. – 479 с.
122. Шкарада М. Производство и применение органических удобрений / М. Шкарада ; пер. с чеш. З. К. Благовещенской. – М. : Агропромиздат, 1985. – 364 с.
123. Справочная книга по химизации сельского хозяйства / под. ред. В. М. Борисова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1980. – 360 с.
124. Стрельченко В. П. Відтворення гумусу в агроекосистемах Полісся / В. П. Стрельченко, А. М. Бовсуновський, О. П. Стецюк // *Вісник аграрної науки*. – 2000. – № 7. – С. 9–11.
125. Кравченко М. С. Землеробство : підручник / М. С. Кравченко, Ю. А. Злобін, О. М. Царенко ; за ред. М. С. Кравченка. – К. : Либідь, 2002. – 496 с.
126. Азізов С. П. Організація аграрного виробництва і бізнесу / С. П. Азізов, П. К. Канінський ; за ред. С. П. Азізова. – К. : Фенікс, 2006. – 790 с.
127. Витрати та ефективність виробництва продукції в сільськогосподарських підприємствах (моніторинг) / за ред. О. Г. Шпикуляка, Ю. П. Воскобійника. – К. : ННЦ ІАЕ, 2008. – 350 с.
128. Шпикуляк О. Г. Ціна як фактор впливу на фінансові результати аграрних підприємств / О. Г. Шпикуляк, Ю. П. Воскобійник, О. В. Овсянніков // *Вісн. Сумського нац. аграр. ун-ту*. – 2008. – № 1(25). – С. 60–67.
129. Ясенєцький В. А. Зниження енергозатрат у тваринництві і кормовиробництві / В. А. Ясенєцький, В. О. Єрмоленко, А. Д. Гарькавий. – К. : Урожай, 1989. – 136 с.

130. Нездвєцька І. В. Використання методів нечіткого моделювання при проектуванні сушильного обладнання / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 170, ч. 1. – С. 378–383.
131. Формалізація параметрів ІЧ-сушильних установок імпульсної дії при моделюванні технологічних процесів сушіння / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець, С. С. Бучик, Л. А. Сидорчук // Вісник ЖДТУ. – 2012. – № 1 – С. 47–52.
132. Руководство по биогазу. От получения до использования / Спец. агентство возобновляемых ресурсов (FNR). – 5-е изд. – Гюльцов (Германия), 2012. – 213 с.
133. Технічне забезпечення виробництва біогазу / Г. А. Голуб, О. В. Дубровіна, Б. О. Рубан, В. О. Войтенко // Зб. наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2012. – Вип. 10. – С. 17–19.
134. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В. Єрмоленко // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.
135. Голуб Г. А. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біомасою обертового метантенка / Г. А. Голуб, О. В. Дубровіна // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип. 170, ч. 2. – С. 55–61.
136. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 13-е изд., испр. – М. : Наука, 1986. – 544 с.
137. Бауман В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. – М. : Машиностроение, 1981. – 324 с.
138. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / Г. А. Голуб. – К. : Аграрна наука, 2007. – 332 с.
139. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3-х т. / В. И. Анурьев ; под ред. Н. А. Жестоковой. – 9-е изд., перераб и доп. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 2. – 290 с.
140. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; под ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб и доп. - К. : Наукова думка, 1988. – 736 с.
141. Куклинг Х. Справочник по физике : пер с нем. / Х. Кухлинг. – 2-е изд. – М. : Мир, 1985. – 520 с.
142. Биомасса как источник энергии : пер с. англ. / под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М. : Мир, 1985. – 368 с.
143. Брагинец Н. В. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства / Н. В. Брагинец, Д. А. Палишкин. – М. : Агропромиздат, 1991. – 191с.
144. Ревенко І. І. Машина та обладнання для тваринництва : підруч. для студ. ВНЗ / І. І. Ревенко, М. В. Брагінець, В. І. Ребенко. - К. : Кондор, 2012. - 730 с.

145. Енергоавтономність виробництва на основі біологічних видів палива [М. В. Молодик, Г. А. Голуб, В. О. Лук'янець та ін.] // Вісник аграрної науки. – 2008. – № 11. – С. 39–44.
146. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, Б. Ю. Матвеев, М. М. Жовнір // Пром. теплотехніка. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 85–93.
147. Новітні технології біоконверсії : монографія / [Я. Б. Блюм, Г. Г. Гелетуха, І. П. Григорюк та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.
148. Гелетуха Г. Г. Обзор технологий сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 6. – С. 3–11.
149. Evald A. Experiences from 61 Straw-Fired District Heating Plants in Den-mark / A. Evald, M. G. Larsen // Ibid. Vol. 1. P. 211–216.
150. Mosbech H. Possibilities and Limitations for Biomass as a Means of CO₂ Reduction in the Danish Heat and Power Production / H. Mosbech, K. Jakobsen // Ibid. Vol. 3. P. 1748–1753.
151. Дубровин В. Сельхозпроизводство как источник энергии / В. Дубровин, М. Мельничук, В. Мироненко // Зерно. – 2006. – № 2. – С. 76–81.
152. Пат. 105346 Україна, МПК F24H 1/10, F23B 60/00. Котел водогрійний для спалювання рослинної біомаси / О. Я. Переходько, Г. А. Голуб; В. А. Дубровін; О. Н. Дімітрев, С. М. Кухарець; О. Я. Переходько ; заявник і патентовласник НУБіП України; № а201310034; заяв. 12.08.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. – 6 с.
153. Гинзбург Д. Б. Газификация топлива и газогенераторные установки / Д. Б. Гинзбург. – М. ; Л. : Гизлегпром, 1938. – Ч. 1. – 604 с.
154. Коллеров Л. К. Газомоторные установки / Л. К. Коллеров. – Л. : Машгиз, 1951. – 239 с.
155. Гинзбург Д. Б. Теория и расчет транспортных газогенераторов / Д. Б. Гинзбург. – М., 1943. – 178 с.
156. Коллеров Л. К. Газификация твердых топлив. Теория подобия и ее применение при исследовании газогенераторной установки / Л. К. Коллеров ; под ред. В. В. Никифорова. – М. ; Л. : Машгиз, 1952. – 72 с.
157. Юдушкин Н. Г. Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет / Н. Г. Юдушкин, М. Д. Артамонов. – М. : ГОСНТИМЛ, 1955. – 244 с.
158. Черномордник Б. М. Теория и расчет транспортных газогенераторов / Б. М. Черномордник. – М. ; Свердловск : Машгиз НКТМ, 1943. – 344 с.
159. Rensfelt E. Practical Achievements in Biomass Gasification / E. Rensfelt // Bioenergy 84 / ed. H. Egnéus, A. Ellegård. – London : Elsevier Applied Science, 1985. – Vol. 1. – P. 174.
160. Енергобіотехнологія : курс лекцій для студ. с.-г. вузів / [В. Г. Мироненко, В. О. Дубровін, В. М. Поліщук та ін.]. – К. : Холтех, 2010. – 248 с.
161. Окоча А. І. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / А. І. Окоча, Я. Ю. Білоконь. – К. : Укр. Центр духовної культури, 2004. – 448 с.

162. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции : учеб. пособие / В. Н. Талиев. – М. : Стройиздат, 1976. – 295 с.
163. Волков О. Д. Проектирование вентиляции промышленного здания / О. Д. Волков. – Х. : Вища шк., 1989. – 240 с.
164. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі : підручник / Дідур В. А, Савченко О. Д., Журавель Д. П., Мовчан С. І. – К. : Аграрна освіта, 2008. – 577 с.
165. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под. ред. М. О. Штейнберга. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
166. Артамонов П. А. Переэтерификация жиров : обзор / П. А. Артамонов. – М., 1962. – 71 с.
167. Гринберг Г. Модифицированные жиры / Г. Гринберг, Г. Щепанская. – М., 1973. – 152 с.
168. Загальна хімія : підручник для студ. вищ. навч. закл. / [Карнаухов О. І., Копілевич В. А., Мельничук Д. О. та ін.]. – К. : Фенікс, 2005. – 840 с.
169. Хімія жирів : підручник / [Тютюнников Б. Н., Бухштаб З. І., Гладкий Ф. Ф. та ін.] ; за ред. Ф. Ф. Гладкого. – Х. : ХПІ, 2002. – 452 с.
170. Семенов В. Г. Биодизельное топливо: стан і перспективи розвитку / В. Г. Семенов // Автошляховик України. – 2007. – № 2. – С. 13–15.
171. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України / Забарний Г. М., Кудря С. О., Кондратюк Г. Г., Четверик Г. О. – К. : Інститут відновлюваної енергетики, 2006. – 226 с.
172. Gerpen J. Biodiesel processing and production / Jon Van Gerpen // Fuel Processing Technology. – 2005 – Vol. 86. – P. 1097–1107.
173. The Biodiesel Handbook / ed. G. Knothe, J.V. Gerpen, J. Krahl. – Champaign, Illinois : AOCS Press, 2005. – 304 p.
174. Biodiesel Production Technology / [J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko et. al.] ; National Renewable Energy Laboratory subcontractor report NREL/SR-510-36244. – 2004. – 110 p.
175. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк ; пер. с пол. под ред. И. А. Щупляка. – Л. : Химия, 1975. – 384 с.
176. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности / З. Штербачек, П. Тауск ; пер. с чеш. под. ред. И. С. Павлушенко. – Л. : Госхимиздат, 1963. – 416 с.
177. Голуб. Г. А. Ефективність виробництва дизельного біопалива із ріпакової олії / Г. А. Голуб // Вісник аграрної науки. – 2011. – № 6. – С. 33–36.
178. Дубровін В. О. Розробка технологічної схеми лінії виробництва біодизельного палива з рослинних олій «холодного» віджиму / В. О. Дубровін, С. В. Драгнев, М. С. Даценко // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту. – 2007. – Вип. 107, ч. 1. – С. 270–278.
179. Дубровин В. А. Технологии и технические средства производства биодизельного топлива из растительных масел / В. А. Дубровин, С. В. Драгнев // Аграрна техніка та обладнання. – 2008. – № 1. – С. 67–73.

180. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учебник для машиностроительных вузов / [Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.
181. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 736 с.
182. Лаврентьев М. А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М. : Наука, 1973 – 417 с.
183. Некрасов Б. Б. Гидравлика, насосы и гидроприводы / Б. Б. Некрасов. Минск, 1985 – 420 с.
184. Васильцов Э. А. Аппараты для перемешивания жидких сред : справ. пособие / Э. А. Васильцов, В. Г. Ушаков. – Л. : Машиностроение, 1979. – 272 с.
185. Гидромеханические машины и аппараты в химической промышленности / [В. Ф. Харин, Г. П. Кабанов, В. Н. Щербаков и др.]. – Красноярск : Сибирский технолог. ин-т, 1978. – 125 с.
186. Аністратенко В. О. Математичне планування експериментів в АПК / В. О. Аністратенко, В. Г. Федоров. – К. : Вища школа, 1993. – 375 с.
187. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
188. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Ацелкин, П. М. Рощин. – Л. : Колос, 1980. – 168 с.
189. Мовсесов Г. Є. Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів : рекомендації / Г. Є. Мовсесов, О. О. Ляшенко ; Ін-т механізації тваринництва НААН України. – Запоріжжя : ІМТ НААН України, 2010. – 29 с.
190. O. Hascke. Biogas von A bis Z. / O. Hascke, M. Helm. – Borsig Energy GmbH, 2001. – 47 p.
191. Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / [Геммеке Бурга, Крисста Ригер, Войланд Петер и др.]. – Гюльцов : FNR, 2010. – 118 с.
192. Biogasgewinnung und – nutzung : handreichung / [Amon Tomas, fon Bredov Hartvig, Doeler Helmut ets.]. – Gulzow (FNR), 2010. – 234 s.
193. Tasneem Abbasi. Biogas Energy / Tasneem Abbasi, S. M. Tauseet, S. A. Abbasi. New York : Springer, 2012. – 169 p.
194. Баадер В. Биогаз:теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, Бренндерфер ; пер. с нем. и предисл. М. И. Серебряного. – М. : Колос, 1982 148 с.
195. Эдер Б. Биогазовые установки : практ. пособие / Барбара Эдер, Хайнц Шульц. Zorg Biogas, 2008 – 268 с.
196. Глінка М. Л. Загальна хімія : підручник / М. Л. Глінка. – Вид. 2-ге, перероб. і доп. – К. : Вища школа, 1982. – 608 с.
197. Голуб Г. А. Випробування гідрореактивного змішувача при виробництві дизельного біопалива / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для

сільського господарства України : зб. наук. пр. / ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2014. – Вип. 18, кн. 2. – С. 350–355.

198. Викиди забруднюючих речовин у атмосферу від котлів комунального сектору потужністю менше 50 мВт. Методика визначення. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2005. – 18 с.

199. Теплотехніка: Підручник. (за ред. Б.Х. Драганова). – Вид. 2-ге, перероб. і доп. - К.: Фірма «ІНКОС», 2005. - 400 с.

200. ДСТУ 6081:2009. Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги. К. : Держстандарт України, 2009.

201. ДСТУ 7166:2010. Біоетанол. Технічні умови. К. : Держстандарт України, 2010.

202. ДСТУ 7178:2010. Паливо альтернативне. Естери етилові жирних кислот олій та жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги та методи контролювання. – К. : Держстандарт України, 2011.

203. ДСТУ EN 14103–14112. Стандарти на методи визначення якості метилових ефірів жирних кислот. – К. : Держстандарт України, 2009.

204. Голуб Г. А. Кінетика процесу відстоювання олійної маси / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2012. – Вип 170, ч. 1. – С. 16–21.

205. Голуб Г. А. Вплив параметрів естерифікації ріпакової олії на якість дизельного біопалива / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Зб. наук. пр. ПДАТУ – 2013. – Спец. вип. : Сучасні проблеми збалансовано природокористування. – С. 193–198.

206. Виробництво та використання дизельного біопалива на основі рослинних олій / Голуб Г. А., Павленко М. Ю., Чуба В. В., Кухарець С. М. ; за ред. Г. А. Голуба. – К. : НУБіП України, 2015. – 119 с.

207. 14. Пат. 100569 Україна, МПК С10L1/10, С10L1/08, С11С3/04, В01J14/00. Обладнання для виробництва біодизельного пального / Г. А. Голуб; М. І. Вільова; заявник і патентовласник НУБіП України № а201100450 ; заявл. 14.01.2011 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 5 с.

208. 15. Пат. 83164 Україна, МПК С10L1/10, С10L1/08, С11С3/04, В01J14/00. Обладнання для виробництва дизельного біопального / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко, В. В. Чуба ; заявник і патентовласник НУБіП № u201303451 ; заявл. 20.03.2013 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

209. Голуб Г. А. Експлуатаційні параметри роботи двигуна при застосуванні дизельного біопалива / Г. А. Голуб, В. В. Чуба // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 196, ч. 1. – С. 23–31.

210. Голуб Г. А. Оцінка витрати пального при застосуванні дизельного біопалива / Г. А. Голуб, В. В. Чуба // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2014. – Вип. 99, т. 2. – С. 76–83.

211. Голуб Г. А. Математичне моделювання експлуатаційних показників роботи машинно-тракторного агрегату на дизельному біопаливі / Г. А. Голуб, В. В. Чуба // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 194, ч. 1. – С. 181–187.
212. Гречкосій В. Вплив біодизеля на двигун / В. Гречкосій // Механізація сільського госп-ва. – 2007. – № 1. – С. 22–23.
213. Гуков Я. С. Використання біопалива в сільському господарстві України / Я. С. Гуков, І. П. Масло // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту. – 2004. – Вип. 73, ч. 1. – С. 96–99.
214. Надикто В. Експлуатаційні показники МТА під час роботи на біодизелі / В. Надикто, В. Дідур, В. Федоренко // Пропозиція. – 2008. – № 4. – С. 128–132.
215. Семенов В. Біодизельне паливо можна використовувати при експлуатації дизельних двигунів / В. Семенов // Харчова і переробна промисловість. – 2007. – № 4. – С. 4–5.
216. Bockey D. Production and marketing in Germany 2005 / Dieter Bockey, Wienke von Schenk ; Union for the Promotion of Oil and Protein Plants. – 2005. – 8 р.
217. Брагинец Н. В. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства / Н. В. Брагинец, Д. А. Палишкин. – М. : Агропромиздат, 1991. – 191 с.
218. Ревенко І. І. Машиновикористання у тваринництві / І. І. Ревенко, В. М. Манько, В. І. Кравчук ; за ред. І. І. Ревенка. – К. : Урожай, 1999. – 208 с.
219. Кузубов Н. В. Методология моделирования агропромышленных формирований / Н. В. Кузубов. – К. : Ин-т экономики НАН Украины, 1996. – 145 с.
220. Дубровін В. О. Розвиток аграрного виробництва: економіка, екологія, технологія / В. О. Дубровін, С. М. Іванюта, В. Ф. Іванюта / Розвиток продуктивних сил України від В. І. Вернадського до сьогодення : зб. наук. пр. РВПС України НАН України. – К. : РВПС України НАН України, 2008. – Ч. 2. – С. 172–176.
221. Мацибора В. І. Економіка підприємства : навч. посіб. / В. І. Мацибора, В. К. Збарський, Т. В. Мацибора. – К. : Каравела, 2008. – 312 с.
222. Іванюта П. В. Управління ресурсами і витратами : навч. посіб. / П. В. Іванюта, О. П. Лугівська ; за ред. Іванюти С. М. – К., 2008. – 435 с.
223. Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження : ДСТУ 2155-93. – [чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1995. – 21 с. – (Національні стандарти України).
224. ГСТУ 46.012-2000. Техніка сільськогосподарська. Методи економічного оцінки техніки для тваринництва.
225. СОУ 74.3-37-269:2005. Техніка сільськогосподарська. Теплогенератори. Методи випробувань.
226. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки машин на этапе проектирования : ГОСТ 24056-88:88. – [Действующий от 1989-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 26 с.

227. Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності : [навч. посіб.] / М. М. Черемісін, В. І. Романченко. – Х. : Факт, 2006. – 168 с.
228. Медведовський О. К. Біоенергетична оцінка інтенсивних технологій вирощування сільськогосподарських культур / О. К. Медведовський. – К. : Урожай, 1993. – 65 с.
229. Кардашов А. Т. Енергетичний баланс агроєкосистеми: проблеми теорії і практики / А. Т. Кардашов, І. В. Шудренко // Вісник ДААУ. – 1998. – № 2. – С. 39–43.
230. Голуб Г. А. Ефективність виробництва дизельного біопалива із ріпакової олії / Г. А. Голуб // Вісник аграрної науки. – 2011. – № 6. – С. 33–36.
231. Czudec A. Odnawialne zrodla energii jako element zrownowzonego rozwoju rolnictwa i obszarow wiejskich / Adam Czudec, Bogumila Grzebyk, Grzegorz Slusarz // Stowarzyszenie na rzecz Wsparcia Przemian w Polskim Rolnictwie “Klub Integracji z Wiejska Europa” – Rzeszow: Zaklad Polityki Gospodarczej I Agrobiznesu, 2006 – S. 54.
232. Голуб Г. А. Собівартість виробництва олії та дизельного біопалива в умовах сільськогосподарських підприємств / Г. А. Голуб, С. В. Лук'янець // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. – 2012. – Спец. вип. : Сучасні проблеми збалансованого природокористування. – С. 207–212.
233. Голуб Г. А. Оцінка сировинної бази виробництва дизельного біопалива при двохступінчатому віджиманні рослинної олії / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Наук. вісн. Нац. університету біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 194, ч. 1. – С. 175–181.
234. Лук'янець С. В. Ефективність виробництва дизельного біопалива в умовах сільськогосподарських підприємств / С. В. Лук'янець, Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко // Розвиток аграрної науки у сучасних умовах : зб. тез наук. робіт міжнар. наук.-практ. конф., 12-13 жовт. 2012 р. – Львів : Львівська аграрна фундація, 2012. – С. 34–38.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Кухарця С.М.

за темою монографії

(з 2010 року)

Монографії, підручники, посібники та рекомендації

1. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко, І. П. Григорюк, В. М. Поліщук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня, С. В. Драгнєв, І. В. Свистунова, С. М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 612 с.
2. Рекомендації щодо створення сільськогосподарського обслуговуючого кооперативу для надання послуг у виробництві та реалізації біопалива у Житомирській області / [Н. М. Головченко, В. Є. Данкевич, С. В. Добрякова, В. О. Дубровін, Г. Р. Зіміна, В. В. Зіновчук, Н. В. Зіновчук, В. М. Карпюк, В. В. Кухарець, С. М. Кухарець, А. В. Ращенко]. – Житомир, 2011. – 96 с.
3. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко, І. П. Григорюк, В. М. Поліщук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня, С. В. Драгнєв, І. В. Свистунова, С. М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 244 с.
4. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / [В. О. Дубровін, Л. Д. Романчук, С. М. Кухарець, І. Г. Грабар, Л. В. Лось, Г. А. Голуб, С. В. Драгнєв, В. М. Поліщук, В. В. Кухарець, І. В. Нездвєцька, В. О. Шубенко, А. А. Голубенко, Н. М. Цивенкова]. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.
5. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / [Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець, В. В. Гох, С. В. Осауленко, О. А. Завадська, Б. О. Рубан, Н. Л. Поліковська, Р. Л. Швець, В. В. Чуба, М. Ю. Павленко]. – К.: НУБіП України, 2014. – 106 с.
6. Виробництво та використання дизельного біопалива на основі рослинних олій / [Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко, В. В. Чуба, С. М. Кухарець]. – К.: НУБіП України, 2015. – 119 с.
7. Кухарець С. М. Механіко-технологічне обґрунтування параметрів обладнання для підвищення енергетичної автономності агроєкосистем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук : спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / С. М. Кухарець. - К., 2015. - 43 с.
8. Біодизель та біоеталон. Модуль. / [В.А.Дубровін, Г.А.Голуб, В.М.Поліщук, К.М.Сера, О.А.Марус, С.В.Драгнєв, М.Ю.Павленко, В.В.Чуба, С.М.Кухарець]. – UNIDO, 2015. – 54 с.
9. Біогаз. Модуль. / В.А.Дубровін, Г.А.Голуб, В.М.Поліщук, К.М.Сера, О.А.Марус, С.В.Драгнєв, М.Ю.Павленко, В.В.Чуба, С.М.Кухарець]. – UNIDO, 2015. – 48 с.

Статті у фахових виданнях

10. Нездвєцька І. В. Оптимізація сушіння коренів цикорію / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець, О. Д. Муляр // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2010. – № 1. – С. 319–325.
11. Сарана В. В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини / В. В. Сарана, М. М. Гудзенко, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2010. – Вип. 144, Ч. 3. – С. 190–197.
12. Драгнєв С. В. Обґрунтування конструктивних параметрів періодичного реактора етерифікації рослинних олій / С. В. Драгнєв, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2010. – Вип. 144, Ч. 4. – С. 190–197.
13. Медведський О. В. Оцінка ефективності засобів механізації доїння корів в умовах дрібнотоварного виробництва / О. В. Медведський, С. М. Кухарець // Вісник ЖНАЕУ. – 2011. – № 2, т. 1. – С. 203–209.
14. Кухарець С. М. Алгоритм розподілу органічних ресурсів у агроєко-системах / С. М. Кухарець // Зб. наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. Серія «Технічні науки». – 2012. – Вип. 10.–Т. 1. – С. 61–66.
15. Кухарець С. М. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2012. – Т. 1 (30), № 1. – С. 345–352.
16. Нездвєцька І. В. Використання методів нечіткого моделювання при проектуванні сушильного обладнання / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – Вип. 170, Ч. 1. – С. 378–383.
17. Формалізація параметрів ІЧ-сушильних установок імпульсної дії при моделюванні технологічних процесів сушіння / І. В. Нездвєцька, С. М. Кухарець, С. С. Бучик, О. Л. Сидорчук // Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. – 2012. – № 1. – С. 47–52.
18. Науково-технічні та економічні особливості виробництва і використання біопалив у агроєкосистемах / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, І. В. Нездвєцька, О. В. Коновалов // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2012. – Т. 1 (31), № 2. – С. 187–195.
19. Кухарець В. В. Формування стратегії управління конверсії біосировини у сільськогосподарських підприємствах / В. В. Кухарець, С. М. Кухарець // Збірник наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. Серія «Економічні науки». – 2012. – Вип. 1.– Т. 1. – С. 87–91.
20. Кухарець С. М. Регулювання використання органічних ресурсів для виробництва біопалива / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Сільськогосподарські машини: зб. нук. ст. – Луцьк, 2013. – Вип. 24. – С. 187–194.
21. Кухарець С. М. Аналіз процесу отримання біодизельного пального та обґрунтування основних параметрів реактора-розділювача / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, В. М. Хрус // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. –

Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – 2014. – С. 164–171.

22. Кухарець С. М. Механіко-технологічний підхід до конструювання агроєкосистеми / С. М. Кухарець // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2014. – Т.1 (39), № 1. – С. 187–197.

23. Кухарець С. М. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук. пр. ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2014. – Вип. 18 (32), Кн. 2. – С. 356–365.

24. Голуб Г. Особливості конструкції модульної біогазової установки з обертовим реактором / Г. Голуб, С. Кухарець, Б. Рубан // Техніка і технології АПК. – 2014. – № 9 (60). – С. 10–14.

25. Кухарець С. М. Вплив конструктивно-технологічних параметрів складових вакуумної системи на стабільність режимних характеристик мобільної доїльної установки / С. М. Кухарець, О. Ю. Романишин, О. В. Медведський // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2014. – Т. 4 (45), №2, Ч.1. – С. 290–298.

26. Кухарець С. М. Аналіз процесів утворення та горіння генераторного газу в котлах для спалювання соломи / С. М. Кухарець // Вісн. Житомир. нац. агрокол. ун-ту. – 2014. – Т. 4 (45), № 2, Ч. 2. – С. 336–344.

27. Обґрунтування режимних характеристик пластинчасто-роторного вакуумного насоса двосторонньої дії / О. В. Медведський, С. В. Бушма, С. М. Кухарець, О. В. Коновалов // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 1 (39), т. 1. – С. 197–203.

28. Голуб Г. А. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистеми / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 196, Ч. 2. – С. 20–27.

29. Кухарець С. М. Обґрунтування основних параметрів котлів із верхнім горінням / С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 196, Ч. 2. – С. 238–250.

30. Голуб Г. А. Ефективність використання котлів із верхнім горінням для спалювання соломи / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. Я. Переходько // Вісник Сумського нац. аграрного ун-ту. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2014. – Вип. 11 (26). – С. 28–32.

31. Особливості виробництва біопалива та отримання енергії в умовах агропромислового виробництва / Г. Голуб, С. Кухарець, В. Шубенко, Н. Бовсунівська // Техніка і технології АПК. – 2015. – № 2 (65). – С. 31–34

32. Кухарець С. М. Дослідження енергетичних показників обертового біогазового реактора / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2015. – Вип. 101. – С. 200–206.

33. Дослідження енергетичної ефективності циркуляційних реакторів-розділювачів / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. Ю. Осипчук, М. Ю. Павленко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і

технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – 2015. – Вип. 19. – С. 276–282.

34. Дослідження енергетичної ефективності котлів із верхнім горінням / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. Я. Переходько [та ін.] // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України / ДНУ УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – 2015. – Вип. 19. – С. 283–288.

35. Кухарець С. М. Сировинна база та ефективність виробництва біогазу / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 1. – С. 11–20.

36. Кухарець С. М. Дослідження енергетичної ефективності обертових метантенків / С. М. Кухарець, В. Г. Спиридонов // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 248–253.

37. Голуб Г. А. Двоємнісна модель гумусного стану ґрунтового середовища агроєкосистем / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 302–307.

38. Голуб Г. А. Визначення параметрів руху частинок біомаси під час обертання метантенка / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 254–264.

39. Голуб Г. А. Ефективність функціонування багатопрофільного сільськогосподарського підприємства / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, ч. 2. – С. 35–44.

40. Технічні та технологічні пропозиції отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, О. В. Скидан, О. Ю. Осипчук // Вісник ЖНАЕУ. – 2015. – № 2 (50), т. 1. – С. 369–385.

41. Механіка руху частинок по обертових лопатках реакторів зброджування / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, О. А. Марус, Я. Д. Ярош / Техніка і технології АПК. – 2016. – № 3 (78). – С. 10–13

42. Голуб Г.А. Оцінка обладнання для сушіння зерна з використанням відновлювальних джерел енергії / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець, Я. Д. Ярош // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2016. – Вип. 241, С. 263–271.

43. Кухарець С.М. Отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб // Наук. вісн. ТДАТУ. – 2016. – Вип. 6, Т. 1. – С. 80–98. – Режим доступу до журн.: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf6t1/9.pdf>

44. Взаємозв'язок потужності насоса для перемішування рослинної олії та параметрів дискового змішувача / Г. А. Голуб, М. Ю. Павленко, В. В. Чуба [та ін.] // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 240. – С. 343–348.

45. Голуб Г.А. Перспективи використання обладнання з циркуляційним перемішуванням при виробництві дизельного біопалива / Г. А. Голуб, С. М.

Кухарець, М. Ю. Павленко // Наук. вісн. НУБіП України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 240. – С. 377–382.

Статті у закордонних виданнях

46. Кухарець С. Н. Обеспечение рационального использования сырья для получения биотоплива в агропромышленном комплексе / С. Н. Кухарець, Г. А. Голуб, С. В. Драгнев // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, No 4. – P. 69–76.

47. Определение основных параметров камеры газификации газогенератора на сырье растительного происхождения / Н. Цивенкова, А. Голубенко, С. Кухарець, В. Шубенко // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 112–119.

48. Обоснование рациональности использования продуктов газификации соломы в технологическом процессе сушки зерновых / С. Кухарець, В. Шубенко, А. Голубенко, Н. Цивенкова // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, No 5. – P. 99–107.

49. Голуб Г. Эффективность использования оборудования для производства дизельного биотоплива / Г. Голуб, М. Павленко, С. Кухарець // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 17, No 3. – P. 11–16.

50. Анализ процесса получения биодизельного горючего и обоснование основных параметров реактора-разделителя / Г. Голуб, С. Кухарець, О. Осыпчук, В. Кухарець // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 17, № 9. – P. 149–155.

Статті у інших виданнях

51. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems / G. Golub, V. Dubrovin, S. Kukharets, O. Marus, M. Pavlenko, V. Chuba // Міжнародний електронний журнал «Біоресурси планети і якість життя». – 2013. – Вип. 4. – Режим доступу до журн.: <http://gchera-ejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/article/view/146/112>.

52. Кухарець С. М. Використання біомаси сільськогосподарського походження як джерела теплової енергії / С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, О. Я. Переходько // Агро 1. Приложение к журналу «AgroOne». – 2016. - №2. – С. 14–15.

53. Кухарець С. Н. Производство биометана в сельском хозяйстве / С. Н. Кухарець // AgroOne. – 2016. - №3 (5). – С.24–25.

54. Голуб Г. А. Газова автономія / Г. А. Голуб, С. М. Кухарець // The Ukrainian Farmer. – 2016. - №3. – С. 181-182.

Патенти на винаходи

55. Пат. 96243. Україна, МПК А23N 12/08, А23L 3/54. А23В 7/02, F26В 3/30. Установка для сушіння сипких харчових продуктів рослинного походження / Лось Л. В., Кухарець С. М., Нездвецька І. В., Шубенко В. О.; заявник та патентовласник Житомир. агрокол. ун-т. – № а201014824; заявл. 10.12.2010;

опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19. (Здобувач здійснив патентний пошук та запропонував конструкцію обертового барабана).

56. Пат. 105346 Україна, МПК F24H1/10, F23B60/00. Котел водогрійний для спалювання рослинної біомаси / Переходько О. Я., Голуб Г. А., Дубровін В. О., Дімітрєв О. Н., Кухарець С. М.; заявник та патентовласник Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування України. – № а201310034; заявл. 12.08.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. №8.

57. Пат. 96063 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г. А., Кухарець С. М. ; заявник і патентовласник Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування України. – № u 2014 09261 ; заявл. 19.08.2014 ; дата публікації 12.01.2015, Бюл. № 1. (Корисна модель).

58. Пат. 110077 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. Метантенк / Голуб Г. А., Кухарець С. М. ; заявник і патентовласник Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування України. – № а 2014 09259 ; заявл. 19.08.2014 ; дата публікації 10.11.2015, Бюл. № 21.

Матеріали і тези конференцій

59. Кухарець С. М. Виробництво твердого біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва / С. М. Кухарець, В. В. Кухарець, О. О. Осадчий // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. – 2011. – Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – С. 159–163.

60. Кухарець С. М. Енергоавтономність агроєкосистем на основі біологічних видів палива / С. М. Кухарець // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – 2012. – С. 149–154.

61. Кухарець С. М. Енергоавтономність агроєкосистем на основі біологічних видів палива / С. М. Кухарець // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – 2012. – С. 149–154.

62. Кухарець С. М. Обґрунтування механіко-технологічних основ конструювання агроєкосистем / С. М. Кухарець, Б. А. Шелудченко // Зб. наук. пр. Подільського держ. аграр.-техн. ун-ту. Спец. вип. Сучасні проблеми збалансованого природокористування: наук.-практ. конф. – 2013. – С. 164–171.

63. Обґрунтування технологічного процесу сушіння зернових із використанням сировини рослинного походження / А. А. Голубенко, Н. М. Цивенкова, С. М. Кухарець, В. О. Шубенко // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні». – (10–11 квітня 2013). – Львів, 2013. – С. 166–171.

64. Golub G. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems / Golub G., Kukharets S., Marus O. // The 8th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings – (25–28 June, 2013).– 2013. – P. 59–65.

65. Dubrovin V. Energy analysis of solid biofuels production from agro biomass / V. Dubrovin, S. Drahniev, S. Kukharets // Second International Conference on Natural and Antropic risks IGNAR. – Bacau, Romania, 2014. – P. 183.
66. Кухарець С. М. Ефективність функціонування багатопрофільного сільськогосподарського підприємства / С. М. Кухарець // Аграрна наука, освіта, виробництво: європейський досвід для України : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 17–18 листоп. 2015 р. – Житомир : ЖНАЕУ, 2015. – С. 65–70.
67. Кухарець С. М. Отримання енергії в аграрному виробництві на основі інноваційних технологій / С. М. Кухарець // Сучасний стан і перспективи ефективного використання земельних ресурсів Житомирської області : зб. ст. наук.-практ. конф., 20–21 січ. 2016 р. – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2016. – С. 96–100.
68. Кухарець С. М. Особливості виробництва біометану / С. М. Кухарець // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». – (7–8 квітня 2016). – Житомир, 2016. – С. 42–45.
69. Кухарець С.М. Ефективність виробництва органічної продукції багатопрофільним сільськогосподарським підприємством /С.М. Кухарець, Я.Д. Ярош, Н.М. Цивенкова// Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Органічне виробництво і продовольча безпека». – (12 травня 2016). – Житомир, 2016. – С. 55–60.
70. Кухарець С. М. Ефективність виробництва біогазу в контексті розвитку аграрних підприємств / С. М. Кухарець, В. В. Кухарець, Я. Д. Ярош // Інтелектуальна економіка: глобальні тенденції та національні перспективи: Матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. – Житомир: ЖНАЕУ. 2016. – С. 116–124.

Зміст

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ОЦІНКА СТАНУ КОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ В ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ	4
1.1. Аналіз можливостей підвищення енергетичної автономності агроecosистеми.....	4
1.2. Аналіз технологій та технічних засобів для виробництва газоподібного, рідкого палива та отримання енергії при спалюванні твердого палива	9
1.3. Особливості представлення агроecosистеми у вигляд складної структури.....	13
1.4. Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища агроecosистем	25
1.5. Оцінка рівня енергетичної автономності сільськогосподарського виробництва.....	38
1.6. Наукова концепція механіко-технологічного обґрунтування енергетичної автономності агроecosистем.....	41
1.7. Висновки до розділу 1	43
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕНЕРГОРЕСУРСІВ	44
2.1. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертових реакторів	44
2.2. Обґрунтування основних конструкційних параметрів обертового реактора	68
2.3. Аналіз процесів утворення та горіння генераторного газу в котлах із верхнім горінням.....	81
2.4. Встановлення основних параметрів котлів із верхнім горінням для спалювання соломи.....	86
2.5. Аналіз процесу отримання дизельного біопалива та обґрунтування основних параметрів циркуляційних реакторів-розділювачів	96
2.6. Висновки до розділу 2	102
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОБІОУСТАНОВОК	105
3.1. Методика дослідження енергетичних витрат на привід обертових реакторів в біогазових установках	105
3.2. Методика дослідження енергетичної ефективності спалювання соломи в котлах із верхнім горінням	108
3.3. Методика дослідження енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива в циркуляційних змішувачах.....	111

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ ІЗ СИРОВИНИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ЕЛЕМЕНТІВ АГРОЕКОСИСТЕМИ У ВИРОБНИЦТВІ.....	115
4.1. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва біогазу в обертових реакторах та результати їх перевірки у виробництві	115
4.2. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва теплової енергії із соломи зернових та результати їх перевірки у виробництві	126
4.3. Формування технічних пропозицій та проектних рішень із виробництва рідкого біопалива в циркуляційних реакторах та результати їх перевірки у виробництві	132
4.4. Висновки до розділу 4	141
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ АГРОЕКОСИСТЕМИ З ВИРОБНИЦТВОМ БІОПАЛИВА ТА АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ КОМПОНЕНТІВ	143
5.1. Економічна ефективність виробництва біогазу в обертових реакторах	143
5.2. Економічна ефективність використання котлів із верхнім горінням для спалювання соломи	151
5.3. Економічна ефективність виробництва дизельного біопалива із циркуляційних змішувачів	156
5.4. Удосконалена модель агроecosистеми з виробництвом біопалив та її оцінка	159
5.5. Висновки до розділу 5	163
ВИСНОВКИ	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	167
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ	183

Наукове видання

С. М. КУХАРЕЦЬ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
АВТОНОМНОСТІ АГРОЕКОСИСТЕМ.
МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ**

Монографія

Редактор *В. В. Кухарець*
Макетування та дизайн обкладинки *В. В. Кухарець*

Підписано до друку 10.06.16 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman.
Умов.-друк. арк. 11,62.
Наклад 300 прим. Зам № 80

Свідоцтво суб'єкта про державну реєстрацію
ДК №3402 від 23.02.2009 р.
Житомирський національний агроекологічний університет
10008, м. Житомир, бульвар Старий, 7, тел. (0412) 37-49-44