

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ПОЛЩУК ВІКТОР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 662.7:631.1

**ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ  
ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА  
І ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ**

05.05.11 «Машини і засоби механізації  
сіськогосподарського виробництва»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України

**Науковий консультант**

доктор технічних наук, професор  
**Войтюк Валерій Дмитрович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
завідувач кафедри технічного сервісу  
та інженерного менеджменту  
імені М. П. Момотенка

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Дідур Володимир Аксентійович**,  
Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного,  
завідувач кафедри технічного сервісу в АПК

доктор технічних наук, професор  
**Миرونенко Валентин Григорович**,  
Національний науковий центр  
«Інститут механізації та електрифікації  
сільського господарства» НААН,  
головний науковий співробітник  
відділу електрифікації та автоматизації  
агропромислового виробництва

доктор технічних наук, професор  
**Анісімов Віктор Федорович**,  
Вінницький національний  
аграрний університет,  
професор кафедри агроінженерії  
та технічного сервісу

Захист відбудеться «18» грудня 2019 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «15» листопада 2019 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Матеріали дисертації увійшли до науково-дослідних робіт за темами: «Розробка комплексних технологічних та природоохоронних заходів при реалізації чистого виробництва біопалив для АПК» (номер державної реєстрації 0108U001864, 2008–2011 рр.); «Розробка інтегральних ресурсозберігаючих технологій виробництва високоліквідної натуральної рослинної сировини, її

переробки і зберігання на основі адаптивних агробіоінженерних систем» (номер державної реєстрації 0109U003220, 2009–2013 рр.); «Розробити комплексні ресурсощадні технології виробництва і використання біопалив на агропромислових підприємствах та у сільській місцевості» (завдання: «Визначити способи підвищення ефективності виробництва дизельного біопалива із заданими показниками якості»; «Розробити ресурсощадні технології виробництва та використання твердого біопалива для теплопостачання виробничих та побутових приміщень агропромислового комплексу»; «Розробити технології переробки органічних відходів з виробництвом біогазу в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція») (номер державної реєстрації 0112U003005, 2012–2014 рр.); «Розроблення інноваційних високоефективних технологій збирання та переробки енергетичних культур для біогазових установок» (номер державної реєстрації 0117U001254, 2017–2019 рр.); «Обґрунтувати параметри субстрату для підвищення ефективності біогазових технологій» (номер державної реєстрації 0116U008083, 2016–2019 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційного дослідження – підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва шляхом обґрунтування техніко-технологічної системи виробництва та використання біопалива.

Для реалізації поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- провести аналіз: сучасного стану світового і вітчизняного паливно-енергетичного комплексу та оцінити можливість часткової заміни викопних видів палива на біопалива; існуючих технологій та технічних засобів виробництва та використання біопалива; концепцій комплексного виробництва і використання біопалива у сільському господарстві; проведених теоретичних та експериментальних досліджень процесів виробництва та очищення біопалива;

- удосконалити технологічні процеси виробництва біопалива;

- здійснити моделювання та обґрунтування процесів гранулювання біомаси, функціонування біогазової установки та аерозольного промивання біодизеля;

- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри, режими роботи та конструкції вузла гранулювання гранулятора для виробництва паливних гранул з біомаси, системи приготування та дозування субстрату в біогазовій установці та реакторів для нейтралізації і промивання біодизеля;

- провести економічну оцінку впровадження технологій та комплексу обладнання для виробництва і використання біопалива у сільськогосподарське виробництво.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси, машини та обладнання для систем виробництва та використання біопалива в умовах сільськогосподарського виробництва.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу параметрів машин й обладнання та виду сировини для виробництва і використання біопалива у сільському господарстві на його кількісні та якісні характеристики для обґрунтування та розроблення нових конструкційно-технологічних рішень.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження здійснено із застосуванням методів механіки газоподібного, рідкого та суцільного середовища. Динаміка швидкості осадження частинок у шарі біодизеля і виходу біогазу в метантенку встановлювалася за методом Рунге-Кутти на комп'ютері в математичній програмі MathCad за допомогою функції *Rkadapt*. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленому стенді та лабораторній установці із застосуванням методів планування факторного експерименту. Аналіз експериментальних даних здійснювався із застосуванням методів математичної статистики і теорії імовірності на комп'ютері в програмах Excel і MathCad. Оптимізаційні задачі вирішувалися за допомогою методів дихотомії та градієнтного спуску. Математичне моделювання виходу біогазу здійснювалося в інтерактивному графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink, інтегрованому в пакет прикладних програм для числового аналізу MatLab. Порівняння результатів математичного моделювання та експериментальних даних здійснювалося у програмі для роботи з електронними таблицями Excel.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше створено математичну модель системи аерозольного промивання біодизеля, яка дозволяє шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь визначати параметри системи промивання, що зменшує вартісні витрати та загальний час технологічного процесу очищення біодизеля.

Вперше розроблено наукові основи та обґрунтовано вимоги до систем підготовки і дозування сировини в біогазовій установці, які включають експериментальне визначення максимального виходу біогазу при періодичному завантаженні субстрату, розроблення та використання математичної моделі функціонування біогазової установки для отримання залежностей виходу біогазу при поступовому режимі завантаження, встановлення за допомогою методу градієнтного спуску оптимальних параметрів дозування косубстратів.

Вперше розроблено методичні засади та обґрунтовано параметри мішалки реактора для нейтралізації біодизеля, які визначаються за допомогою методу дихотомії за критерієм мінімізації лужного числа нейтралізованого біодизеля, що забезпечує необхідну якість біодизеля.

Удосконалено математичну модель функціонування біогазової установки, в яку включені втрати поживних речовин, які бактерії використовують на виробництво біогазу, що дає можливість врахувати більшу кількість факторів при прогнозуванні виходу біогазу.

Удосконалено концепцію функціонування агробіоінженерної системи з виробництвом і переробкою сільськогосподарської продукції шляхом впровадження технологій та комплексу машин і обладнання виробництва дизельного і гранульованого біопалива та біогазу, яка відрізняється від відомих тим, що сировиною для виробництва біогазу є відходи біодизельного і крохмального виробництв та молокопереробки, для виробництва паливних гранул і брикетів – відходи сільськогосподарського виробництва, що дає можливість збільшити прибуток господарства та вирішити проблему утилізації відходів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені методичні основи формування техніко-технологічних вимог до систем та обладнання виробництва і використання біопалива у сільськогосподарському виробництві.

За результатами виконаних досліджень розроблено науково-практичні рекомендації, удосконалено технологію отримання біогазу із застосуванням мелясної післяспиртової барди; модель виходу біогазу при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням мелясної барди для поступової системи завантаження метантенка передано Товариству з обмеженою відповідальністю «Бітеко Біогаз» для впровадження на Гнідавському цукровому заводі Вінницької області. Також у Товариство з обмеженою відповідальністю «Бітеко Біогаз» передано розроблені за результатами виконаних досліджень: науково-практичні рекомендації та удосконалену технологію отримання біогазу із застосуванням кисломолочної сироватки в якості косубстрату; модель виходу біогазу при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням кисломолочної сироватки для поступової системи завантаження метантенка та експрес-метод визначення теплоти згоряння біогазу для впровадження на біогазових установках підприємств агропромислового комплексу України.

На основі удосконаленої технології отримання біогазу із застосуванням сирого гліцерину, яку передано в Товариство з обмеженою відповідальністю «ТАН», для Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» було спроектовано біогазовий реактор. Також для Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» розроблено технічні умови ТУ У 29.2-14247520-006:2008 «Лінії виробництва дизельного біопалива типу ЛВДБ-ЕКО-БІО», згідно з якими впроваджено лінію промислового виробництва дизельного біопалива з розробленими реакторами для нейтралізації і промивання біодизеля.

Удосконалену технологію промивання біодизеля і обладнання для аерозольного промивання біодизеля для лінії виробництва дизельного біопалива типу ЛВДБ-ЕКО-БІО впроваджено у Товаристві з обмеженою відповідальністю «ТАН». Вузол аерозольного промивання біодизеля впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Укрекспо-Процес».

Методичні розробки з розрахунку конструктивних і технологічних параметрів машин та обладнання для виробництва паливних гранул з біомаси; практичні рекомендації щодо виробництва і використання гранульованого біопалива впроваджено при проектуванні і запуску в експлуатацію лінії з виробництва деревних паливних гранул у приватному підприємстві «Малинська меблева фабрика». Технологія та обладнання комплексного виробництва і використання біопалива впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Сріблянка-Агро»; концепцію розвитку сільських територій із застосуванням технологій та комплексу машин і обладнання для виробництва і використання біопалива впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Біомаса-Карбон».

Міністерством аграрної політики та продовольства України затверджено рекомендації для агропромислових підприємств України: «Способи підвищення ефективності виробництва дизельного біопалива із заданими показниками якості» (рішення секції технічної політики, сільськогосподарського машинобудування та охорони праці науково-експертної ради, протокол № 70 від 5 листопада 2014 р.); «Технології переробки органічних відходів з виробництвом біогазу в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (рішення секції технічної політики, сільськогосподарського машинобудування та охорони праці науково-експертної ради, протокол № 70 від 5 листопада 2014 р.).

Результати дисертації впроваджено у навчальному процесі механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, розробки і результати, що виносяться на захист, отримано здобувачем самостійно та відносяться до галузі машин і засобів сільськогосподарського виробництва. У працях, що опубліковані у співавторстві, здобувачем використано лише власну частину результатів. Постановка завдань досліджень, формулювання основних положень роботи, визначення структури дисертації, аналіз та трактування результатів, виконано разом із науковим консультантом.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлено та обговорено на: XX Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (смт Глеваха, 2012 р.); VI Міжнародній науковій конференції «Екобіотехнології та біопалива в АПК – Energia 2012» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 115-річчю НУБіП України та 15-річчю GCHERA (м. Київ, 2013 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2013 р.); XXII Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (смт Глеваха, 2014 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2015 р.); XIII Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Knowledge Society» (м. Варшава, Республіка Польща, 2014 р.); IX Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Наука і життя: сучасні тенденції, інтеграція в світову наукову думку» (м. Київ, 2014 р.); XI Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Альтернативні проблеми сучасної науки» (м. Київ, 2014 р.); XV Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку

технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2015 р.); III Міжнародному науково-технічному конгресі «Agricultural Machinery» (м. Варна, Республіка Болгарія, 2015 р.); XVI Міжнародних наукових конференціях, присвячених 115-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015 р.); XVI Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції в рамках XXVIII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО-2016» «Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалив в АПК» (м. Київ, 2016 р.); XIII Міжнародній науковій конференції «Раціональне використання енергії в техніці» (м. Київ, 2017 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології аграрного виробництва» (м. Київ, 2017 р.); XVII Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2017 р.); XIX Міжнародній науковій конференції, присвяченій 118-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2018 р.); XIV Міжнародній науковій конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2018» (м. Київ, 2018 р.); XVIII Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2018 р.); VI Міжнародній науковій конференції «Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції в АПК» (м. Київ, 2018 р.); XIX Міжнародній конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2019 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції з нагоди 112 річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича «Крамаровські читання» (м. Київ, 2019 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (м. Київ, 2019 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Біоенергетичні системи» (м. Житомир, 2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 108 наукових працях, з яких 2 монографії, 21 статей у наукових фахових виданнях України, 16 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 11 статей у наукових виданнях інших держав, 5 статей в інших наукових виданнях, 8 патентів України на корисну модель, 2 навчальні посібники, 2 науково-методичні рекомендації, 50 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з анотацій, вступу, шести розділів, висновків списку використаних джерел та додатків в вигляді окремої книги на 829 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 422 сторінки. Дисертація містить 145 рисунків та 40 таблиць. Список використаної літератури налічує 511 джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Стан питання та завдання дослідження**» розглянуто сучасний стан світового та вітчизняного паливо-енергетичного комплексу. Встановлено, що у зв'язку з вичерпуваністю запасів та значною шкодою довкіллю викопних палив для часткової їх заміни доцільно використовувати біопалива, які є відновлюваним ресурсом і більш екологічно чисті. Наведено класифікацію та характеристики біопалива. Встановлено, що використання рослинної олії в якості палива для дизельних двигунів ускладнене внаслідок її високої в'язкості. Найбільш адаптованим для використання в дизельних двигунах біопаливом є складні ефіри жирних кислот, які називають біодизелем. Біодизель має низький вміст сірки, однак, на відміну від нафтового дизельного палива, володіє при цьому хорошими змащувальними властивостями, високе цетанове число – 51, що покращує запуск двигуна, а також високу температуру спалаху (не менше 110 °C), що робить його використання відносно безпечним. Водночас, підвищення тиску впорскування до 25 % і робочої температури системи живлення, може негативно впливати на надійність роботи насосів та призвести до дещо прискореного утворення нагару на форсунках. При низьких температурах в'язкість біодизеля зростає, а в ньому утворюються кристали воску, які закупорюють фільтри системи живлення двигуна, що викликає недостатню його стійкість до низьких температур. Неочищений від залишків метанолу біодизель характеризується агресивністю стосовно гумових ущільнюючих матеріалів, фарб і кольорових металів. За теплою згорання біодизель на 10 % поступається мінеральному дизпаливу (37,2 МДж/кг в біодизеля проти 42,5 МДж/кг в нафтовому дизпаливі). Тому потужність двигуна, що працює на біодизелі, знижується в середньому на 7 %, а її компенсації необхідне збільшення витрати палива на 5–8 %. Вказані недоліки характерні для чистого біодизеля, при його змішуванні в невеликій кількості (до 5 %) з нафтовим дизельним паливом вплив негативних властивостей біодизеля не відчувається.

Основний спосіб використання біогазу – його конверсія в електричну і теплову енергію на когенераційних установках після обов'язкового очищення від сірководню, який може здійснювати корозійний вплив на деталі двигуна внутрішнього згорання електрогенератора. Необхідність виробництва гранульованого біопалива обумовлена потребою в ущільненні біомаси для зменшення транспортних витрат. Гранульоване біопаливо використовується як в промислових котельних установках для виробництва теплової енергії, так і в побутових котлах.

З кожним роком актуальність питання техніко-технологічного розвитку виробництва і використання біопалива у сільському господарстві зростає. Дослідженнями в цій галузі займалися В. Ф. Анісімов, В. А. Войтов, Г. Г. Гелетуха, Г. А. Голуб, В. А. Дідур, С. В. Драгнєв, В. О. Дубровін, Д. П. Журавель, С. М. Кудря, С. М. Кухарець, В. М. Кюрчев, В. Г. Мироненко, Г. Є. Мовсєсов, В. М. Павліський, В. М. Павліченко, Г. С. Ратушняк, В. С. Таргоня, І. В. Фльонц, С. М. Циганков, С. А. Шворов іні. Проведено аналіз технологій та технічних засобів виробництва і використання біопалива. Здійснено загальний опис і оцінку сучасного стану сільськогосподарського виробництва в Україні, визначено основні проблеми та шляхи їх вирішення. Проведено аналіз існуючих концепцій комплексного виробництва і використання біопалива в Україні і в світі, розроблених в керівних органах Ради Європи та в Уряді України, а також такими вченими, як Г. А. Голуб, В. О. Дубровін, Г. М. Калетник, С. М. Кухарець, М. В. Роїк. Проаналізовано теоретичні та експериментальні дослідження процесів і систем промивання метилового ефіру жирних кислот, або, як його ще називають – біодизеля, генерування біогазу і гранулювання біомаси. Проблемою осадження твердих частинок і краплин у шарі рідини займалися О. Г. Вєтошкін, М. І. Гальперін, Ф. Г. Зуєв, О. М. Плановський, В. С. Шалугін та іні. Математичні моделі функціонування метантенка розроблялися Д. С. Дворецьким, С. А. Корольовим, Л. А. Кущєвим, Е. Д. Лапіним, Д. В. Майковим, Ж.-Л. Моно, Д. Ю. Сусловим, К. Karim, N. Zainol, Lin Yi-Chun та іні. Дослідженням процесів гранулювання біомаси займалися С. В. Мельников, В. А. Войтов, З. М. Кучінскас, О. Д. Мюллер, В. І. Назаров, В. І. Особов, А. М. Попов та іні.

Проведений аналіз показав, що питання впровадження технологій та обладнання виробництва і використання біопалива в сільське господарство потребує додаткових досліджень щодо якості виробленого біопалива, параметрів систем підготовки та дозування різних видів сировини для біогазових технологій, обладнання для гранулювання біомаси.

Тому в основу роботи покладено техніко-технологічний розвиток системи виробництва і використання біопалива в умовах сільського господарства.

У другому розділі «**Теоретичні дослідження**» розглянуто моделювання процесів: промивання біодизеля, функціонування метантенка, гранулювання біомаси, для обґрунтування техніко-технологічних вимог до обладнання для виробництва біопалива.

Моделювання процесу промивання біодизеля. Осадження дрібних частинок забруднювача (сіль лужних металів), форма яких близька до циліндричної, в шарі біодизеля під дією сили тяжіння здійснюється повільно (рис. 1, а). Це не дозволяє швидко проводити очищення біодизеля. Висунемо гіпотезу, що при русі крупних краплин води, які розпилюються над шаром біодизеля, вони за рахунок незкомпенсованості сил міжмолекулярної взаємодії на границі розділу фаз поглинають дрібні частинки забруднювача і швидко їх осаджують (рис. 1, б). Таким чином здійснюється промивання біодизеля.

На підставі рівнянь руху частинки в каналі з врахуванням сил, що діють на частинку (рис. 1, в): тяжіння  $F_g$ , Архімеда  $F_A$ , опору середовища  $F_o$ , було

отримано системи диференціальних рівнянь, які описують осадження частинок у товщі нерухокої рідини, що розміщена в каналі діаметром  $d_k$ :

– частинок забруднювача циліндричної форми в ламінарному режимі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_q}{dt} = \frac{12,432 \cdot \mu_p \cdot v_q}{\rho_q \cdot d_q^2 \cdot a \cdot \sqrt[3]{a} \cdot \lg(3,589 \cdot \ln(a) + 15,183)} - \frac{g \cdot (\rho_q - \rho_p)}{\rho_q} ; \\ \frac{dl_{oc}}{dt} = v_q \end{array} \right. ; \quad (1)$$

– краплин сферичної форми в ламінарному режимі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_k}{dt} = \frac{18 \cdot \mu_p \cdot v_k}{d_k^2 \cdot \rho_k} - \frac{g \cdot (\rho_q - \rho_p)}{\rho_k} ; \\ \frac{dl_{oc}}{dt} = v_k \end{array} \right. ; \quad (2)$$

– краплин сферичної форми в перехідному режимі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_k}{dt} = \frac{10 \cdot \mu_p^{0,5} \cdot \rho_p^{0,5} \cdot v_k^{1,5}}{d_k^{1,5} \cdot \rho_k} - \frac{g \cdot (\rho_q - \rho_p)}{\rho_k} , \\ \frac{dl_{oc}}{dt} = v_k \end{array} \right. ; \quad (3)$$

де  $v_q$  – швидкість осадження частинки забруднювача циліндричної форми, м/с;  $v_k$  – швидкість осадження краплини сферичної форми, м/с;  $t$  – час, с;  $\rho_p$ , – щільність рідини (біодизеля), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_q$  – щільність частинки забруднювача (солей лужних металів), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  – щільність краплини води, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_p$  – динамічна в'язкість рідини (біодизеля), Па·с;  $d_q$  – діаметр частинки забруднювача, м;  $d_k$  – діаметр каналу, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $a$  – відношення висоти циліндричної частинки забруднювача до її діаметра;  $l_{oc}$  – відстань осадження (довжина каналу), м.

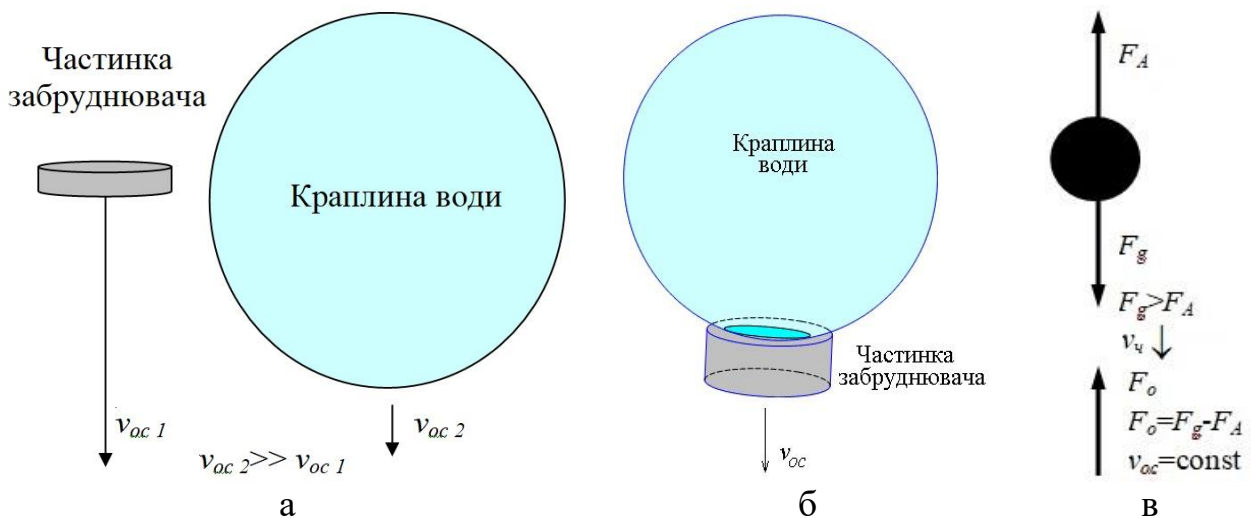


Рис. 1. Схема осадження дрібної частинки забруднювача краплиною води

Розв'язавши системи диференціальних рівнянь (1), (2) і (3) за методом Рунге-Кутти в математичній програмі MathCad, було отримано динаміку зміни

швидкості осадження краплин води і забруднюючих біодизельних частинок (рис. 2), відповідно до якої можна стверджувати, що під дією сили  $F_g$ , яка перевищує силу  $F_A$ , швидкість осадження швидко зростає. Однак, при цьому збільшується сила  $F_o$ , яка починає гальмувати частинку. Швидко настає динамічна рівновага при  $F_o = F_g - F_A$ , коли частинка буде рухатися рівномірно із постійною швидкістю  $v_{oc}$ .

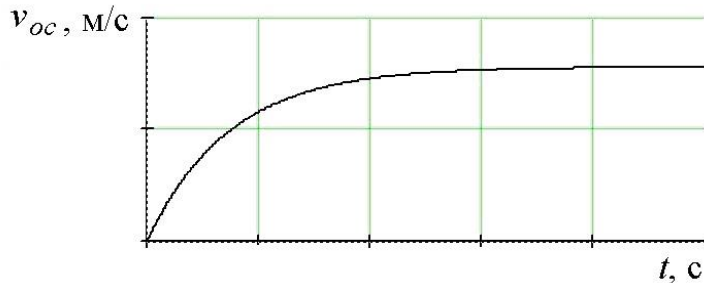


Рис. 2. Динаміка зміни швидкості осадження забруднюючих біодизельних частинок і краплин води

Швидкість осадження частинки забруднювача і краплини води, час їх осадження і критерій Рейнольдса, який характеризує режим їх осадження, наведено в табл. 1. Як частинки забруднювача, так і краплини води, осаджуються, головним чином, при ламінарному режимі. Лише в крупних краплин діаметром більше 2 мм режим осадження перехідний, оскільки  $Re > 2$ .

Таблиця 1

**Швидкість осадження частинки забруднювача і краплини води, час їх осадження і критерій Рейнольда, який характеризує режим їх осадження**

Показник	Діаметр частинки забруднювача, мкм					
	10	50	100	500		
Re	$2,39 \cdot 10^{-13}$	$7,47 \cdot 10^{-10}$	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$7,48 \cdot 10^{-5}$		
$v_{oc}$ , м/с	$3,125 \cdot 10^{-7}$	$7,82 \cdot 10^{-6}$	$3,125 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-4}$		
$t_{oc}^*$ , діб	37	1,48	0,37	0,015		
Показник	Діаметр краплини води, мкм					
	100	500	1000	1500	2000	2500
Re	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,01	0,24	0,8	1,9	3,7
$v_{oc}$ , м/с	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	0,031	0,047	0,062	0,078
$t_{oc}^*$ , хв.	46,3	1,8	0,54	0,35	0,27	0,21

З аналізу табл. 1 можна констатувати, що час осадження крупних краплин води значно менше часу осадження дрібних частинок забруднювача, що підтверджує гіпотезу про можливість транспортування частинок забруднювача крупними краплинами води при промиванні біодизеля. При промиванні біодизеля розпилюванням над ним краплин води діаметром 500–1000 мкм час осадження одиничного забруднювача не перевищує 2 хв.

Моделювання процесу функціонування метантенка. Метантенк біогазової установки функціонує наступним чином. Метаноутворюючі бактерії, які містяться в субстраті, споживають його поживні речовини, виділяючи при цьому продукти метаболізму – біогаз (рис. 3). Поживні речовини субстрату у



поживних речовин субстрату в біогаз, кг/кг;  $\rho_b$ ,  $\rho_c$  – щільність біогазу і субстрату, кг/м<sup>3</sup>;  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$  – безрозмірні коефіцієнти засвоєння субстрату;  $k_a$  – константа, яка дорівнює такій концентрації поживних речовин субстрату, при якій швидкість росту сягає половини граничної, кг/м<sup>3</sup>;  $k_b$  – емпіричний коефіцієнт, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_d$  – максимальна питома швидкість відмирання метаноутворюючих бактерій, доба<sup>-1</sup>;  $\mu_m$  – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба<sup>-1</sup>;  $K_\gamma$  – коефіцієнт швидкості перетворення поживних речовин субстрату в біогаз, м<sup>3</sup>/(кг·добу);  $t$  – час, діб.

Відомі параметри системи (4) такі:  $k=0,27$  кг/кг,  $\rho_c=1050$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_b=1,212$  кг/м<sup>3</sup>, для періодичного завантаження метантенка  $p=0$  діб<sup>-1</sup>, поступового –  $p=0,05$  діб<sup>-1</sup>. Початковими умовами для розв'язання системи (4) є:  $C_0=1$  кг/м<sup>3</sup>,  $S_0=115$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_0=0$  м<sup>3</sup>/кг. Параметри  $\mu_m$ ,  $\mu_d$ ,  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ ,  $K_\gamma$  залежать від температурного режиму метантенка і типу косубстрату. В пакеті Simulink, що інтегрований до програми MATLAB, було проведено імітаційне моделювання процесу функціонування метантенка біогазової установки, який описує система диференціальних рівнянь (4). В результаті отримано динаміку виходу біогазу при періодичному завантаженні (рис. 4, а) і при поступовому завантаженні (рис. 4, б) субстрату.

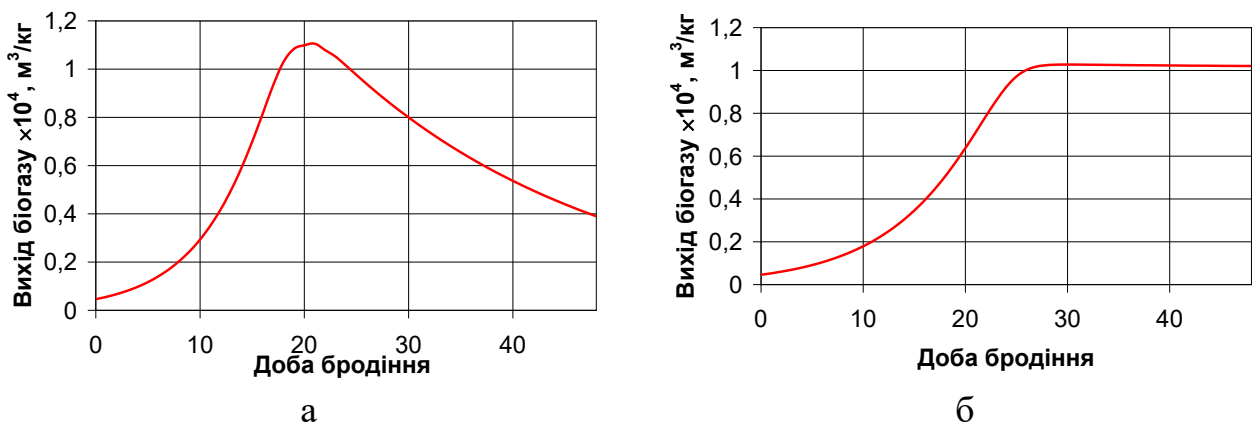


Рис. 4. Динаміка виходу біогазу, отримана в результаті моделювання функціонування метантенка біогазової установки при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням фузу

Моделювання процесу гранулювання біомаси. При проході пресуючого ролика 3 над конічною частиною філь'єри 2 відбувається вирізання біомаси з шару 5 і впресовування її в шар 4, тоді як біомаса з шару 4 вдавлюється в конічний отвір і далі в циліндричний канал філь'єри 1 (рис. 5). З кожним новим проходом пресуючого ролика спресована біомаса глибше просувається по циліндричній частині філь'єри, зазнаючи все більшого ущільнення. Загальний тиск пресування  $P_{пр}$  складається із суми тисків на вирізання біомаси із спресованого шару  $P_{вир}$ , вдавлювання вирізаної біомаси через конічний отвір у циліндричний канал матриці  $P_{кф}$ , проштовхування сформованої гранули з біомаси через циліндричний канал матриці  $P_{цф}$ .

Тиск пресування для діаметрів філь'єри  $d_{\phi}=6$  і 8 мм, довжини її циліндричної частини  $l_{\psi}=10\dots70$  мм із кроком 10 мм і висоти шару сировини, що захоплюється роликком під час пресування,  $h_{np}=1\dots7$  мм із кроком 2 мм, для кутів при вершині конусної частини філь'єри  $2\gamma=10\dots160^{\circ}$  із кроком  $10^{\circ}$ , визначений за формулами, наведеними в роботі А. Н. Попова. Залежність  $P_{np}=f(2\gamma)$  для  $d_{\phi}=6$  мм і  $l_{\psi}=70$  мм представлено на рис. 6. Для інших значень  $d_{\phi}$  і  $l_{\psi}$  значення  $P_{np}$  змінюється (зростає при збільшенні  $d_{\phi}$  і  $l_{\psi}$ ), однак, нахил кривих  $P_{np}=f(2\gamma)$  залишається незмінним. Залежність  $P_{np}=f(2\gamma)$  апроксимується поліномом Ньютона четвертого порядку:

$$P_{np} = b_4 \cdot (2\gamma)^4 + b_3 \cdot (2\gamma)^3 + b_2 \cdot (2\gamma)^2 + b_1 \cdot (2\gamma) + b_0. \quad (5)$$

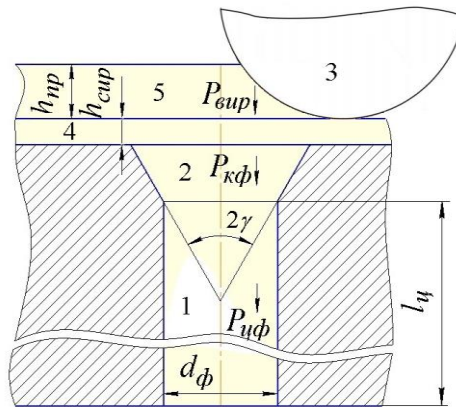


Рис. 5. Схема пресування біомаси в філь'єрі матриці

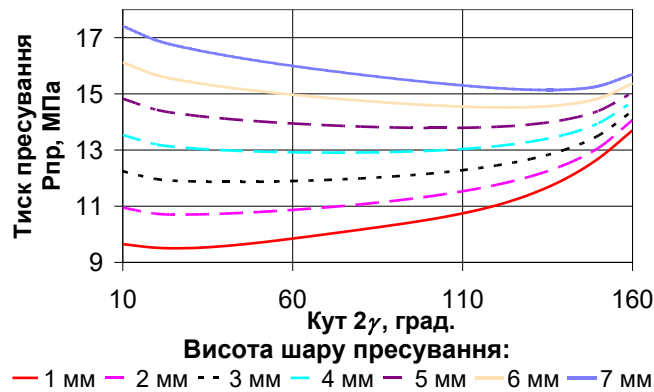


Рис. 6. Залежність  $P_{np}=f(2\gamma)$  для  $d_{\phi}=6$  мм і  $l_{\psi}=70$  мм

Значення коефіцієнтів  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  полінома (5) наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів полінома (5)

$h_{np}$ , мм	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$b_0$	$R^2$
1	$3,560 \cdot 10^{-8}$	$-1,029 \cdot 10^{-5}$	0,001134	-0,04039	9,95	0,9995
2	$3,466 \cdot 10^{-8}$	$-1,019 \cdot 10^{-5}$	0,001137	-0,04617	11,30	0,9990
3	$3,372 \cdot 10^{-8}$	$-1,008 \cdot 10^{-5}$	0,00114	-0,05194	12,65	0,9984
4	$3,278 \cdot 10^{-8}$	$-9,968 \cdot 10^{-6}$	0,001143	-0,05771	14,00	0,9971
5	$3,185 \cdot 10^{-8}$	$-9,860 \cdot 10^{-6}$	0,001146	-0,06348	15,35	0,9953
6	$3,091 \cdot 10^{-8}$	$-9,751 \cdot 10^{-6}$	0,001149	-0,06926	16,70	0,9968
7	$2,997 \cdot 10^{-8}$	$-9,643 \cdot 10^{-6}$	0,001152	-0,07503	18,05	0,9985

Функція  $P_{np}=f(2\gamma)$  була досліджена на екстремум  $P_{np}\rightarrow\min$  методом дихотомії. Встановлено, що оптимальна величина кута  $2\gamma_{opt}$  за умови мінімального значення  $P_{np}$ , апроксимується виразом:

$$2\gamma_{opt} = -0,15 \cdot h_{np}^4 + 1,75 \cdot h_{np}^3 - 3,56 \cdot h_{np}^2 + 6,6 \cdot h_{np} + 25,8 \text{ при } R^2=0,9915. \quad (6)$$

Графічне зображення залежності  $2\gamma_{opt}=f(h_{np})$  наведено на рис. 7.

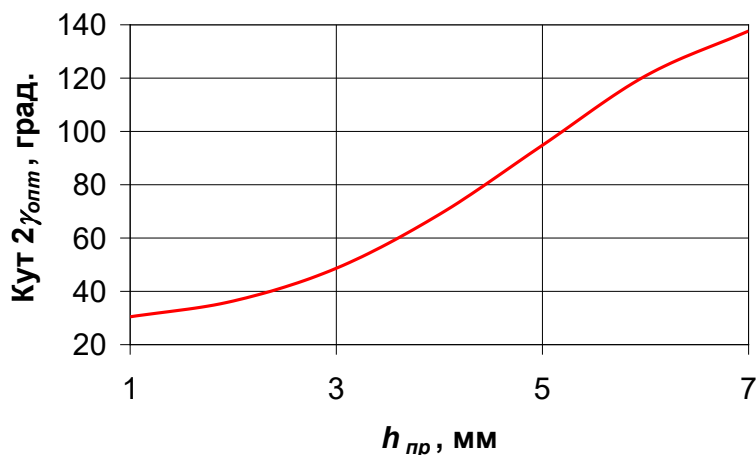


Рис. 7. Залежність  $2\gamma_{opt}=f(h_{np})$  за умови  $P_{np}\rightarrow\min$

Вираз (6) дозволяє визначати конструктивно-технологічні параметри вузла гранулювання за умови мінімальних затрат енергії на пресування.

В третьому розділі «Програма і методики експериментальних досліджень» викладено програму експериментальних досліджень, описано експериментальні установки, вимірювальне обладнання, наведено методики їх проведення та обробки результатів.

Програма експериментальних досліджень передбачала встановлення:

- впливу залежно від температури при нейтралізації біодизеля об'ємним та аерозольним способами: частоти обертання мішалки (при об'ємному способі) і тиску в розпилювачі (при аерозольному способі) на його лужність за допомогою лабораторних стендів;

- впливу залежно від температури і часу при промиванні біодизеля об'ємним, пінним та аерозольним способами: типу мішалки, частоти її обертання (при об'ємному способі), витрати повітря (при пінному способі), типу турбулізатора у відцентровому повноконусному розпилювачі і тиску в ньому (при аерозольному способі) на його лужність за допомогою лабораторних стендів;

- впливу температурного режиму метантенка і дозування вмісту косубстратів до субстрату на основі гною великої рогатої худоби на динаміку і максимальний вихід біогазу при періодичному завантаженні метантенка за допомогою лабораторної біогазової установки;

- значень коефіцієнтів математичної моделі функціонування метантенка при монозброджуванні гною великої рогатої худоби і його зброджуванні при додаванні косубстратів шляхом порівняння динаміки виходу біогазу при математичному моделюванні з експериментальними даними;

– впливу добової заміни субстрату на основі гною великої рогатої худоби на постійний вихід біогазу при поступовому завантаженні метаненка за допомогою лабораторної біогазової установки; порівняння постійного виходу біогазу при поступовому завантаженні метаненка з максимальним виходом біогазу при періодичному завантаженні метантенка і встановлення можливості імітаційного моделювання постійного виходу біогазу при поступовому завантаженні метантенка на основі експериментальних досліджень максимального виходу біогазу при періодичному завантаженні метантенка субстратом на основі гною великої рогатої худоби з додаванням в якості косубстратів сирого гліцерину, мелясної барди, сироватки, борошна і соапстоку у відповідному процентному відношенні до маси субстрату;

– раціональних і оптимальних параметрів дозування косубстратів у системі приготування і дозування біогазової установки за допомогою імітаційного моделювання;

– насипної щільності сировини для виробництва паливних гранул.

Нейтралізація і промивання біодизеля об'ємним способом проводиться на лабораторному стенді, який складається з рідинного термостата ТЖ-ТС-01/16, перемішуючого пристрою ІКА Eurostar Digital із змінними мішалками, лабораторних штативу і стакана об'ємом 500 мл. Температура біодизеля контролюється за допомогою ртутного термометра та змінюється на пульті керування рідинного термостату.

Промивання біодизеля пінним способом здійснюється на лабораторному стенді, який складається з рідинного термостата ТЖ-ТС-01/16, мікрокомпресора з титановим барботером, лабораторних штативу і колби об'ємом 300 мл, скляного трійника для відведення відпрацьованого повітря, гумової пробки і гнучкої трубки.

Нейтралізація біодизеля аерозольним способом проводиться на лабораторному стенді, який складається з рідинного термостата ТЖ-ТС-01/16, лабораторних штативу і стакана об'ємом 500 мл, пневматичного насоса у складі ручного садового обприскувача об'ємом 10 л і компресора від холодильника, відцентрового повноконусного розпилювача «Disc and Core», байонетного ковпачка, корпусу насадки для кріплення розпилювача, гумових гнучких шлангів з дротовою обшивкою з накидними гайками, адаптера гнучких шлангів на чотири виходи з різьбою  $\frac{1}{2}$ ". Тиск контролюється за допомогою манометра.

Промивання біодизеля аерозольним способом проводиться на лабораторному стенді, який складається з лабораторного штативу, ємності для промивання об'ємом 2 л, ємності для збирання промивної води об'ємом 10 л, пневматичного насоса, відцентрового повноконусного розпилювача «Disc and Core» в зборі, гумових гнучких шлангів з дротовою обшивкою з накидними гайками, адаптера гнучких шлангів на чотири виходи з різьбою  $\frac{1}{2}$ ". На лабораторний штатив кріпиться ємність для промивання, в днище якої вмонтований кран для зливання промивної води. Над ємністю для збирання промивної води на тому ж самому лабораторному штативі кріпиться відцентровий повноконусний розпилювач у зборі, до якого за допомогою гумових шлангів з накидними гайками приєднується пневматичний насос. Під

ємність для промивання ставиться ємність для збирання промивної води. Тиск контролюється за допомогою манометра.

При нейтралізації до 300 мл біодизеля, що міститься в лабораторному стакані, при температурі 20 °С, 40, 60 і 80 °С, доливається 16,5 мл 1 % водного розчину лимонної кислоти і здійснюється його перемішування механічним перемішуючим пристроєм з частотами обертання валу 200 об./хв, 350, 500 і 650 об./хв протягом 5 хв, або над стаканом з аналогічною кількістю біодизеля при температурі 20 і 40 °С розпилюється через відцентровий повноконусний розпилювач 16,5 мл 1 % водного розчину лимонної кислоти. Лужність біодизеля визначається за ГОСТ 11362-96 «Нафтопродукти і мастильні матеріали. Число нейтралізації. Метод потенціометричного титрування». Температура біодизеля підтримується за рахунок встановлення ємності з ним у рідинний термостат ТЖ-ТС-01/16.

Час проведення дослідів промивання метилового ефіру становить 4–5 год. Відбір проб біодизеля для визначення його лужності здійснюється через кожну годину.

Критерієм ефективності вологого очищення біодизеля є неперевикнення його лужного числа 5 мг/кг.

Дослідження впливу температурного режиму метантенка і дозування вмісту косубстратів до субстрату на основі гною великої рогатої худоби на динаміку і максимальний вихід біогазу при періодичному завантаженні метантенка, впливу добової заміни субстрату на основі гною великої рогатої худоби на постійний вихід біогазу при поступовому завантаженні метантенка проводилися на лабораторній біогазовій установці, яка виготовлена в науково-технічному центрі «Бомаса», у складі метантенка з періодичним режимом завантаженням сировини і газгольдера «мокрого» типу (рис. 8). Контроль і регулювання температури бродіння здійснювалися терморегулятором ТРЦ-02 через термометр опору ТСМ-50. Об'єм отриманого біогазу один чи декілька разів на добу визначався по шкалі, закріпленій на направляючій 15, по висоті підняття циліндра-рівнеміра 14 газгольдера, з наступним перерахунком при відомому діаметрі циліндра-рівнеміра, який становить 20 см.

Більшість досліджень проводилися при періодичному завантаженні метантенка. При цьому в метантенк завантажуються відміряний об'єм субстрату, кран 16 закривається для створення анаеробного режиму. При суттєвому зменшенні інтенсивності виходу біогазу частина субстрату зливається з метантенка, при цьому залишається затравочна порція субстрату, який містить метаноутворюючі бактерії в обсязі 1/3–2/3 від об'єму метантенка. Температура субстрату при моноброджуванні гною великої рогатої худоби становить 30–55 °С з кроком 5 °С, при додаванні косубстратів до гною великої рогатої худоби – 35 або 40 °С (у випадку додавання сирого гліцерину – 30–50 °С з кроком 5 °С). Досліджувався вміст косубстратів в субстраті: борошна – 1,2 %; 2,3; 5,6 і 10,6 %; сирого гліцерину – 0,6 %; 1,2; 2,3; 3,4 і 6,6 %; соапстоку – 0,6 %; 1,2 і 2,4 %; мелясної барди – 10,5 і 26,1 %; заміна води в субстраті сироваткою – 20–80 % з кроком 20 %; стічними водами виноробних

виробництв – 2 %; 6,5 і 13 %. Критерієм ефективності біогазових технологій є величина виходу біогазу і вміст в ньому метану (теплова цінність біогазу).

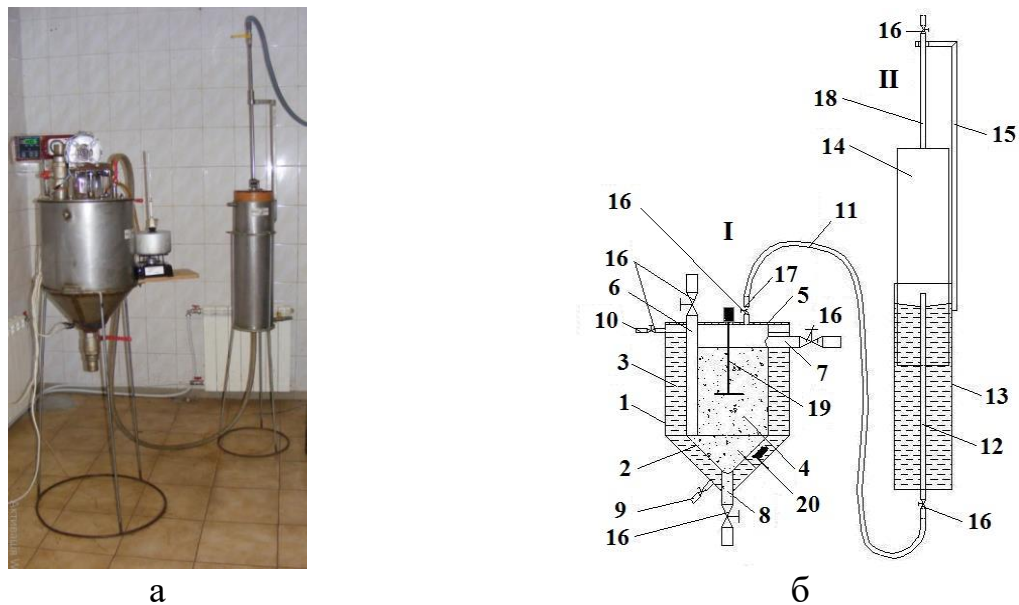


Рис. 8. Лабораторна біогазова установка: а – загальний вигляд; б – принципова схема; I – біореактор; II – газгольдер; 1 – зовнішній корпус біореактора; 2 – внутрішній корпус біореактора; 3 – водяна сорочка; 4 – активна зона біореактора; 5 – кришка; 6, 7, 8 – труба для подачі біомаси, зливання шламу і видалення шламу; 9, 10 – труба для подачі і встановлення рівня води у водяній сорочці; 11 – газопровід; 12 – трубка для подачі біогазу; 13 – корпус газгольдера; 14 – циліндр-рівнемір; 15 – направляюча; 16 – кран; 17 – трубка для відведення біогазу з активної зони біореактора; 18 – трубка для відбору газу із газгольдера; 19 – мішалка; 20 – нагрівач

Методика встановлення значень коефіцієнтів математичної моделі функціонування метантенка при монозброджуванні гною великої рогатої худоби і його зброджуванні при додаванні косубстратів полягає в підборі цих коефіцієнтів і порівнянні динаміки виходу біогазу при математичному моделюванні із експериментальними даними за критерієм наближення коефіцієнта детермінації до одиниці.

При поступовому завантаженні метантенка в разі монозброджування гною великої рогатої худоби субстрат завантажується в метантенк невеликими порціями один раз на добу, така ж сама кількість субстрату при цьому вивантажується з метантенка. Маса субстрату, яка щоденно замінюється в метантенку, становить 6,25 %; 12,5; 25; 33,25 і 50 %, температура субстрату – 30 °С, 40 і 50 °С.

Методика встановлення оптимальних параметрів дозування косубстратів в системі приготування і дозування біогазової установки за допомогою імітаційного моделювання полягає в дослідженні виходу біогазу на екстремум при зброджуванні субстрату в складі гною великої рогатої худоби з додаванням відміряної кількості косубстратів, на основі якого визначається оптимальний вміст різних косубстратів в субстраті.

Насипна щільність сировини для виробництва паливних гранул з біомаси визначається згідно з ДСТУ EN 15103:2013 (EN 15103:2009) «Тверде біопаливо. Методи визначення насипної щільності».

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведено результати експериментальних досліджень очищення біодизеля, інтенсифікації виходу біогазу із застосуванням косубстратів, визначення насипної щільності сировини для виробництва деревних паливних гранул.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що використання аерозольного способу нейтралізації біодизеля при тиску до 0,25 атм є неефективним, оскільки результуюче лужне число біодизеля більше 5 мг КОН/кг (рис. 9, б). Нейтралізацію біодизеля об'ємним способом доцільно здійснювати при температурі 40 °С, оскільки в цьому випадку для досягнення лужного числа біодизеля менше 5 мг КОН/кг потрібно здійснювати перемішування з меншою частотою обертання мішалки (рис. 9, а). Раціональна частота обертання валу мішалки, при якій лужне число біодизеля стає нижче 5 мг/кг, знаходиться в межах 240–410 об./хв. Залежність лужного числа біодизеля від частоти обертання мішалки при його нейтралізації за температури 40 °С апроксимується виразом:

$$ЛЧ = -1,41 \cdot 10^{-9} \cdot n^4 + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot n^3 - 1,08 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 0,169 \cdot n + 37,6, \quad (6)$$

$$R^2=0,9998,$$

де  $ЛЧ$  – лужне число, мг КОН/кг;  $n$  – частота обертання валу мішалки,  $c^{-1}$ .

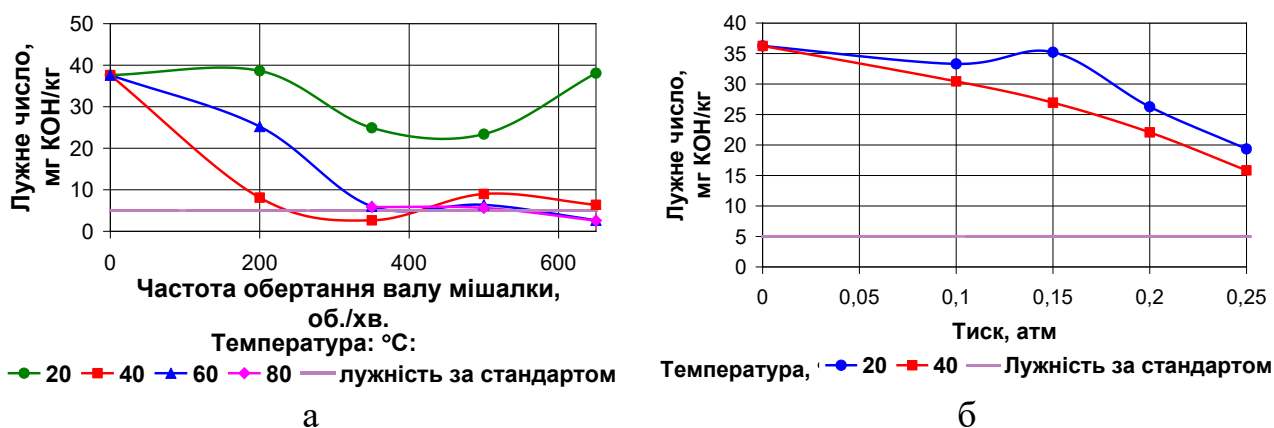


Рис. 9. Результати експериментального дослідження нейтралізації біодизеля: а – об'ємним способом; б – аерозольним способом

Залежність  $ЛЧ=f(n)$  була досліджена на екстремум  $ЛЧ \rightarrow \min$  методом дихотомії. Встановлено, що оптимальна частота обертання валу механічної мішалки при температурі нейтралізації 40 °С, при якій лужне число біодизеля мінімальне (3,7 мг КОН/кг), становить  $n=323$  об./хв.

У результаті експериментального дослідження промивання біодизеля встановлено, що об'ємне промивання протягом 4 год незадовільно звільняє біодизель від солей лужних металів, оскільки результуюче лужне число перевищує 5 мг КОН/кг (рис. 10). Доцільно здійснювати очищення біодизеля від солей лужних металів аерозольним способом при середньо- та крупно-

дисперсному розпилюванні води над шаром біодизеля протягом не менше 5 год (рис. 11).

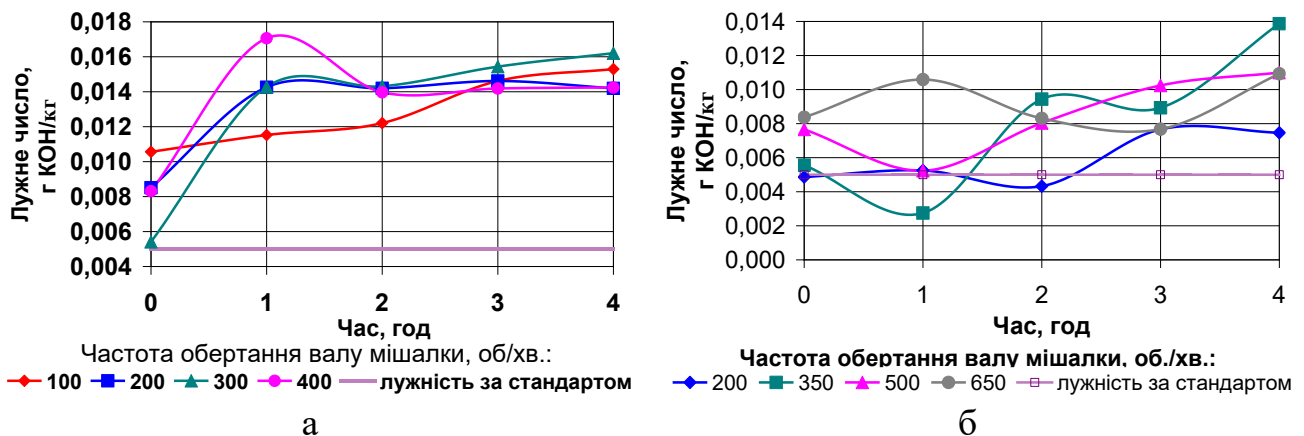


Рис. 10. Результати експериментального дослідження об'ємного промивання біодизеля при перемішуванні: а – дволопатевою мішалкою; б – чотирилопатевою мішалкою з похилими лопатями

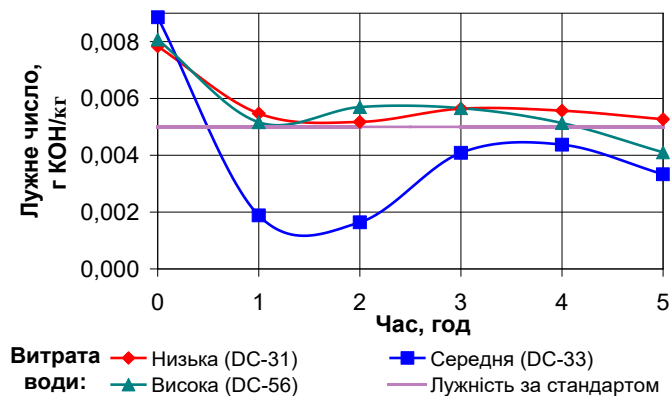


Рис. 11. Результати експериментального дослідження аерозольного промивання біодизеля

Можливе також застосування пінного промивання за витрати повітря понад 60 л/год протягом 4 год барботування, однак, при цьому необхідно в подальшому контролювати лужне число біодизеля, оскільки спостерігається тенденція до його зростання вище 5 мг КОН/кг (рис. 12).

Отже, в результаті експериментальних досліджень очищення біодизеля встановлено, що при проектуванні реакторів для очищення біодизеля потрібно враховувати наступне: нейтралізацію доцільно проводити об'ємним способом при температурі 40 °С і раціональній частоті обертання валу мішалки 240–410 об./хв. (оптимальна частота – 323 об./хв.); промивання біодизеля доцільно здійснювати аерозольним способом при середньо- та крупнодисперсному розпилюванні води протягом не менше 5 год.

Динаміки виходу біогазу при монозброджуванні гною великої рогатої худоби і при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням косубстратів наведено на рис. 13. Дослідження проводилися при періодичному завантаженні метантенка.

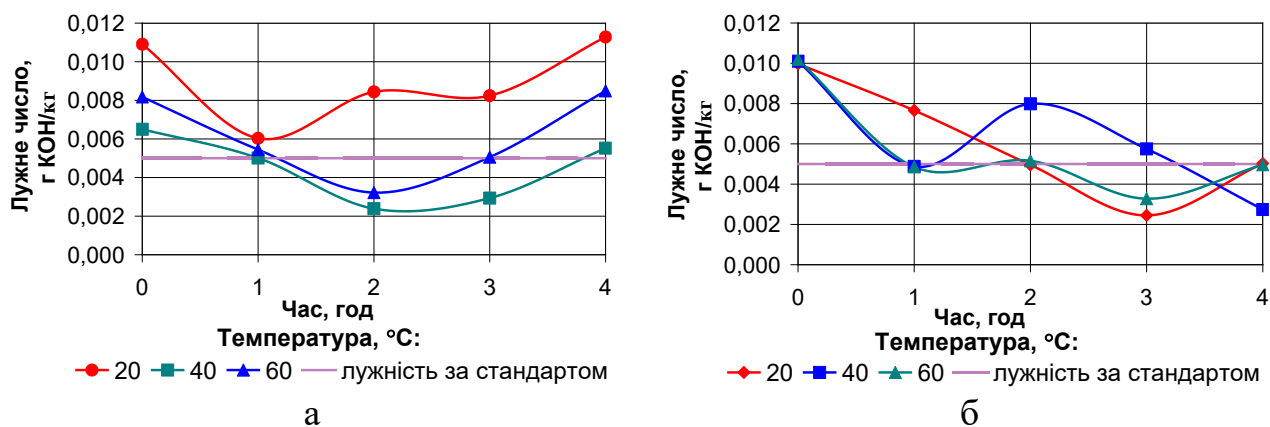


Рис. 12. Результати експериментального дослідження пінного промивання біодизеля за витрати повітря: а – 20 л/год; б – 60 л/год

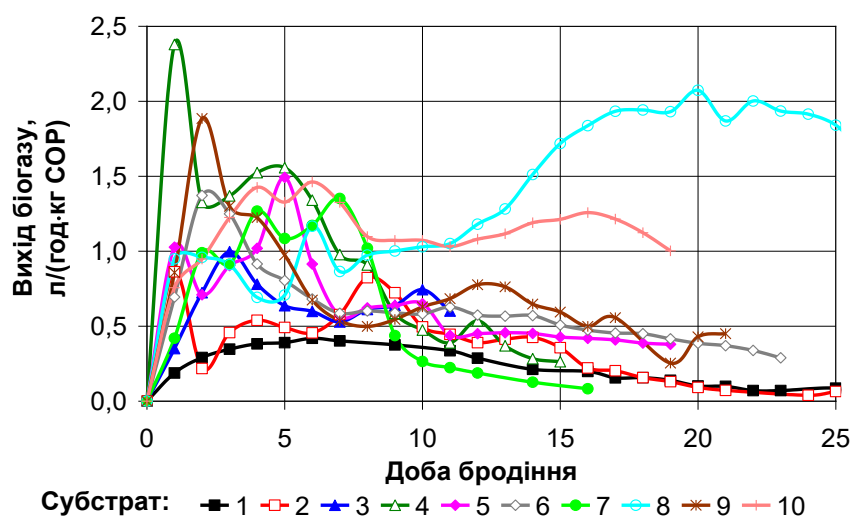


Рис. 13. Експериментальні дані динаміки виходу біогазу при зброджуванні різних субстратів при температурі бродіння 40 °С за періодичної системи завантаження: 1 – гній великої рогатої худоби, монозброджування; 2 – суміш гною великої рогатої худоби і органату; 3 – гній великої рогатої худоби з додаванням крохмалю 5 % сухої органічної речовини від сухої органічної речовини субстрату; 4\* – гній великої рогатої худоби з додаванням 2,3 % борошна від маси субстрату; 5\* – гній великої рогатої худоби із заміною 60 % води в субстраті сироваткою; 6 – гній великої рогатої худоби із заміною 13 % води в субстраті на стічні води виноробних виробництв; 7 – гній великої рогатої худоби з додаванням 34,2 % сухої органічної речовини сирого гліцерину до сухої органічної речовини субстрату; 8 – гній великої рогатої худоби з додаванням 1,3 % фузу від маси субстрату; 9 – гній великої рогатої худоби з додаванням 1,2 % соапстоку від маси субстрату; 10 – гній великої рогатої худоби з додаванням 10,6 % м'ясної барди від маси субстрату

Примітка. \*Температура бродіння 35 °С

На основі проведених досліджень встановлено максимальні виходи біогазу при періодичному режимі завантаження метантенка та розроблено класифікацію сировини по виходу біогазу, згідно з якою сировина поділяється

на чотири категорії. До першої категорії належить основна сировина – гній великої рогатої худоби без додавання косубстратів, зброджування якого в більшості випадків характеризується розтягуванням бродіння в часі без чітко виявлених піків виходу біогазу. Друга категорія косубстратів за динамікою зброджування характеризується коротким періодом бродіння і наявністю діауксії (два чітко виражені максимуми виходу біогазу в часі). До такої сировини належать органат, борошно, сироватка, сирий гліцерин, мелясна барда. Третя категорія косубстратів характеризується коротким періодом бродіння і відсутністю діауксії. До такої сировини належать стічні води виноробних виробництв і соапсток. Фуз належить до четвертої категорії косубстратів і характеризується довгим періодом бродіння з максимумом виходу біогазу на 20 добу, коли активне бродіння більшості з досліджуваної сировини вже закінчилося.

Шляхом підбору параметрів  $\mu_m$ ,  $\mu_d$ ,  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ ,  $K_\gamma$  імітаційної моделі (4) для різних типів косубстратів, їх вмісту в субстраті, температурного режиму метантенка і порівняння результатів імітаційного моделювання динаміки виходу біогазу із результатами експериментальних досліджень добивалися того, щоб імітована модель була найбільш близькою до динаміки виходу біогазу в часі, отриманої експериментальним шляхом. Критерієм подібності слугувало наближення коефіцієнта детермінації  $R^2$  до одиниці. При імітаційному моделюванні всіх субстратів приймалося, що  $k_\alpha=10^{-9}$ ,  $k_\beta=5$ ,  $k_a=14$  кг/м<sup>3</sup>,  $k_b=0,01$  кг/м<sup>3</sup>. Значення коефіцієнтів  $\mu_m$ ,  $\mu_d$ ,  $K_\gamma$  апроксимуються такими виразами:

– при монозброджуванні гною великої рогатої худоби:

$$\mu_m = -0,0002 \cdot T^3 + 0,0261 \cdot T^2 - 1,266 \cdot T + 21,17 \text{ при } R^2=1,0, \quad (7)$$

$$\mu_d = -0,00006 \cdot T^2 + 0,003 \cdot T + 0,075 \text{ при } R^2=0,9930, \quad (8)$$

$$K_\gamma = -1,6 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 2,94 \cdot 10^{-7} \cdot T - 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ при } R^2=0,9990, \quad (9)$$

де  $T$  – температура бродіння, °С;

– при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням органату:

$$\mu_m = -0,014 \cdot T^2 + 1,03 \cdot T - 15,8 \text{ при } R^2=1,0, \quad (10)$$

$$\mu_d = 0,12 \text{ при } R^2=1,0, \quad (11)$$

$$K_\gamma = -1,2 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 1,08 \cdot 10^{-7} \cdot T - 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ при } R^2=1,0; \quad (12)$$

– при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням борошна при  $T=35$  °С:

$$\mu_m = -0,11359 \cdot B + 4,6598 \text{ при } R^2=0,9998, \quad (13)$$

$$\mu_d = 0,1665 \cdot B^{-0,2425} \text{ при } R^2=0,9986, \quad (14)$$

$$K_\gamma = -4,48 \cdot 10^{-7} \cdot B^2 + 2,93 \cdot 10^{-6} \cdot B + 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ при } R^2=0,9999, \quad (15)$$

де  $B$  – вміст борошна в субстраті, %;

– при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням сироватки при  $T=35$  °С:

$$\mu_m = 0,0035 \cdot Wh^2 - 0,37 \cdot Wh + 10,5 \text{ при } R^2=1,0, \quad (16)$$

$$\mu_d = -1,25 \cdot 10^{-5} \cdot Wh^2 + 2,00 \cdot 10^{-3} \cdot Wh + 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ при } R^2=1,0, \quad (17)$$

$$K_\gamma = 8,75 \cdot 10^{-10} \cdot Wh^2 - 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot Wh + 2,95 \cdot 10^{-6} \text{ при } R^2=1,0, \quad (18)$$

де  $Wh$  – вміст сироватки в субстраті, %;

– при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням стічних вод виноробних виробництв при  $T=40$  °С:

$$\mu_m = 0,2414 \cdot \ln(Wd) + 0,5514 \text{ при } R^2=0,9863, \quad (19)$$

$$\mu_d = -1,58 \cdot 10^{-3} \cdot Wd^2 + 3,15 \cdot 10^{-2} \cdot Wh - 4,82 \cdot 10^{-2} \text{ при } R^2=0,9999, \quad (20)$$

$$K_\gamma = -4,1 \cdot 10^{-9} \cdot Wd^2 + 2,62 \cdot 10^{-7} \cdot Wh + 4,23 \cdot 10^{-7} \text{ при } R^2=1,0, \quad (21)$$

де  $Wd$  – вміст стічних вод виноробних виробництв у субстраті, %;

– при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням соапстоку при  $T=40$  °С:

$$\mu_m = 2,0833 \cdot So^2 - 7,75 \cdot So + 8,4 \text{ при } R^2=1,0, \quad (22)$$

$$\mu_d = 0,053 \cdot So + 0,0275 \text{ при } R^2=0,9996, \quad (23)$$

$$K_\gamma = -1,99 \cdot 10^{-6} \cdot So^2 + 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot So - 4,83 \cdot 10^{-7} \text{ при } R^2=1,0, \quad (24)$$

де  $So$  – вміст соапстоку в субстраті, %.

Також апроксимовані значення коефіцієнтів  $\mu_m$ ,  $\mu_d$ ,  $K_\gamma$  для зброджування гною великої рогатої худоби з додаванням сирого гліцерину для широкого спектру температур, а також мелясної барди і фузу.

Розроблена математична модель функціонування біогазової установки з визначеними коефіцієнтами дозволяє прогнозувати основний продукт технологічного процесу: величину виходу біогазу в разі завантаження через системи приготування і дозування субстрату на основі гною великої рогатої худоби з оптимальною та раціональною кількістю косубстратів.

Проведені дослідження динаміки виходу біогазу з гною великої рогатої худоби при поступовому завантаженні метантенка за температури бродіння 40 °С при різних значеннях добової заміни субстрату (рис. 14), яка відповідає описаній в літературних джерелах (Едер Б. і Шульц Х.), коли після логарифмічної фази і досягнення максимуму виходу біогазу процес переходить у стаціонарний режим з невеликими відхиленнями від середнього значення. На цьому ж самому графіку для порівняння наведено динаміку виходу біогазу при періодичному завантаженні гною великої рогатої худоби за температури бродіння 40 °С із зазначенням максимального виходу біогазу 0,758 л/(год·кг сухої органічної речовини). Середній вихід біогазу при поступовому завантаженні метантенка за температури бродіння 40 °С залежно від добової заміни субстрату наведено на рис. 15. Його можна апроксимувати поліномом Ньютона другого порядку:

$$V_6 = -1,5 \cdot 10^{-4} \cdot ДЗС^2 - 0,0134 \cdot ДЗС + 1,06, R^2=0,9948, \quad (25)$$

де  $ДЗС$  – добова заміна субстрату;  $V_6$  – вихід біогазу при поступовому завантаженні метантенка, л/(год·кг сухої органічної речовини).

За виразом (25) можна встановити, що максимальному виходу біогазу 0,758 л/(год·кг сухої органічної речовини) за періодичного завантаження метантенка відповідає такий же самий постійний вихід біогазу при добовій заміні 18,6 % субстрату в метантенку за поступового його завантаження.

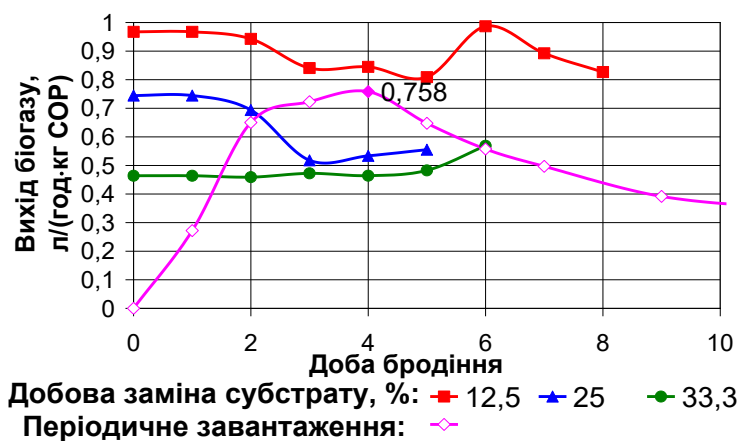


Рис. 14. Порівняння динаміки виходу біогазу при поступовому і періодичному режимах завантаження метантенка за температури бродіння 40 °С

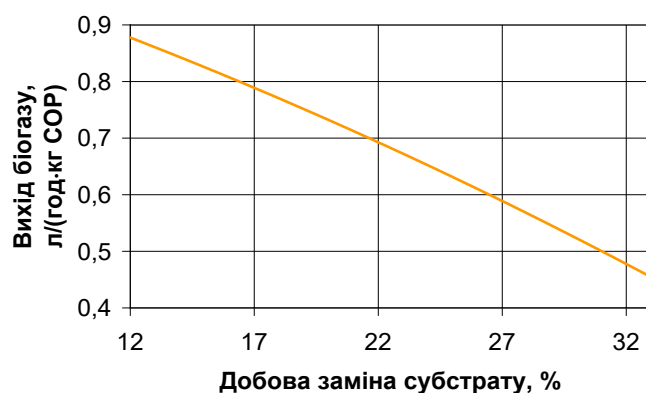


Рис. 15. Середній вихід біогазу при поступовому завантаженні метантенка за температури бродіння 40 °С залежно від добової заміни субстрату

Метантенк біогазової установки, на якій проводилися експериментальні дослідження зброджування субстратів на основі гною великої рогатої худоби з додаванням косубстратів, придатний для періодичного завантаження субстрату. Режим поступового завантаження субстрату на ньому здійснити досить складно. Водночас, на практиці на діючих біогазових установках періодичний режим завантаження метантенка застосовується рідко, частіше використовується поступове завантаження, коли субстрат у метантенк завантажується малими порціями через визначений проміжок часу (як правило, близько 1 год). При цьому вихід біогазу досягає максимального значення від того, який можна отримати при періодичній системі завантаження, і тримається на такому рівні протягом всього часу роботи біогазової установки. Тому на основі дослідів при періодичній системі завантаження метантенка здійснювалося моделювання виходу біогазу при поступовій системі завантаження (рис. 16) субстратом на основі гною великої рогатої худоби з додаванням сирого гліцерину (1), мелясної барди (2), борошна (3), сироватки (4), соапстоку (5). Вихід біогазу при поступовій системі завантаження буде близький до максимального виходу біогазу при періодичній системі завантаження.

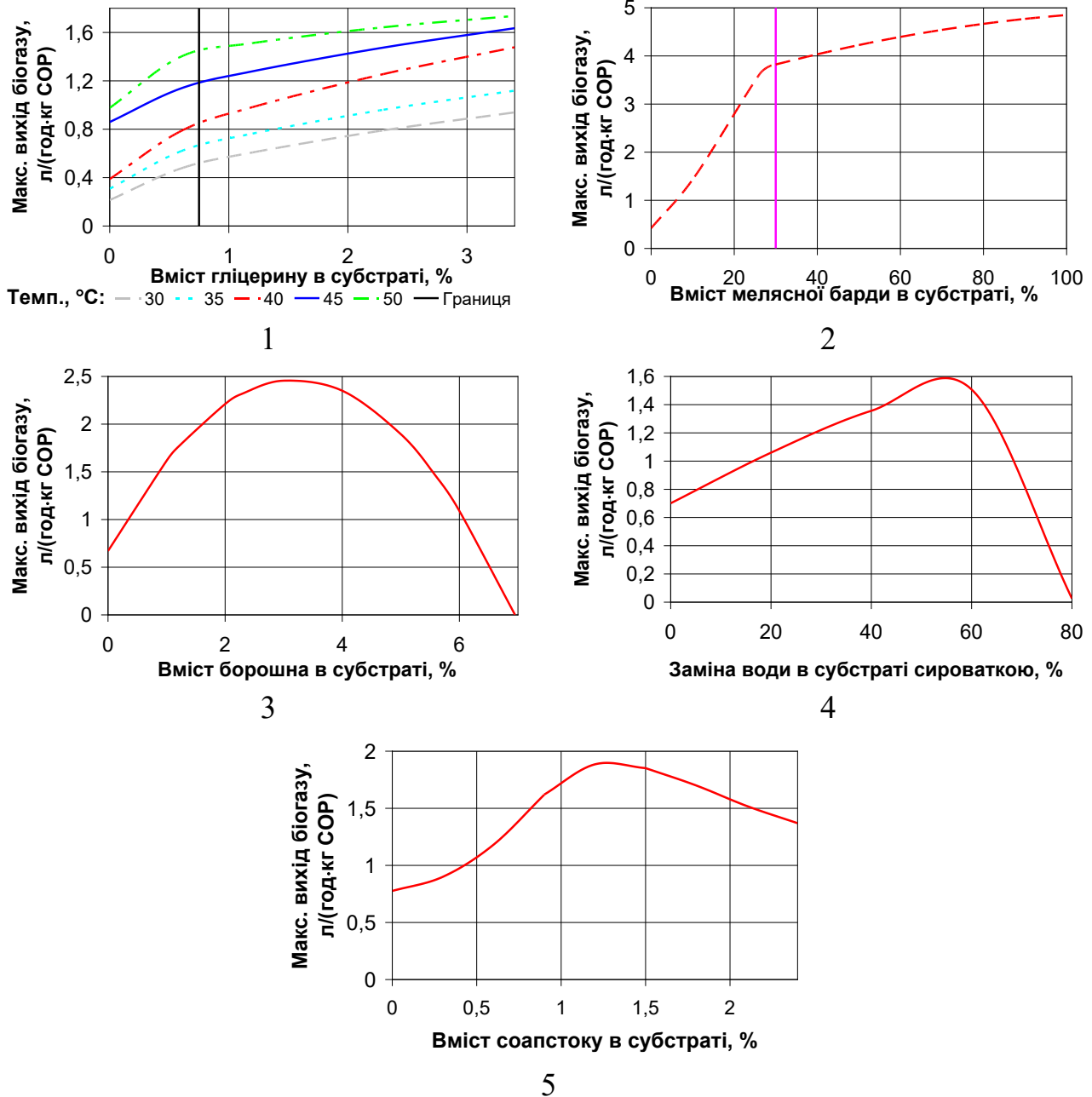


Рис. 16. Змодельований вихід біогазу для поступового завантаження метантенка субстратом

Змодельований вихід біогазу для поступового завантаження субстрату, представлено на рис. 16, апроксимується такими виразами:

– гній великої рогатої худоби з додаванням сирого гліцерину:

$$V_{б,мод} = \left[ 6,08 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 - 9,58 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 0,55894 \cdot T^2 - 14,29677 \cdot T + 135,659 \right] \times G^{(-1,21 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 + 1,737 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 - 9,208 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,14187 \cdot T - 17,899)} + 4,15 \cdot 10^{-6} \cdot T^{3,1649} \quad (26)$$

при  $R^2=0,8654$ ,

де  $V_{б,мод}$  – змодельований вихід біогазу для поступової системи завантаження метантенка, л/кг сухої органічної речовини;  $G$  – вміст гліцерину в субстраті, %;  $T$  – температура бродіння, °C;

– гній великої рогатої худоби з додаванням мелясної барди:

$$V_{\text{б.мод}} = -0,00018 \cdot MW^3 + 0,0079 \cdot MW^2 + 0,039 \cdot MW + 0,42$$

для  $MW \leq 30$  при  $R^2=0,9999$ ,

$$V_{\text{б.мод}} = -0,00011 \cdot MW^2 + 0,029 \cdot MW + 3,05 \text{ для } MW \geq 30$$

при  $R^2=0,9995$ ,

(27)

де  $MW$  – вміст мелясної барди у субстраті, %;

– гній великої рогатої худоби з додаванням борошна:

$$V_{\text{б.мод}} = -0,175 \cdot B^2 + 1,12 \cdot B + 0,67 \text{ при } R^2=0,9982,$$
(28)

де  $B$  – вміст борошна в субстраті, %;

– гній великої рогатої худоби з додаванням сироватки:

$$V_{\text{б.мод}} = -3,65365 \cdot 10^{-7} \cdot Wh^4 + 4,20967 \cdot 10^{-5} \cdot Wh^3 -$$

$$- 0,00158 \cdot Wh^2 + 0,03561 \cdot Wh + 0,701$$

при  $R^2=0,9394$ ,

(29)

де  $Wh$  – заміна води в субстраті сироваткою, %;

– гній великої рогатої худоби з додаванням соапстоку:

$$V_{\text{б.мод}} = 0,8722 \cdot So^2 + 0,1517 \cdot So + 0,776 \text{ для } So \leq 0,9 \text{ при } R^2=0,9950,$$

$$V_{\text{б.мод}} = -1,6556 \cdot So^2 + 4,36 \cdot So - 0,963 \text{ для } 0,9 \leq So \leq 1,5 \text{ при } R^2=0,9997,$$

$$V_{\text{б.мод}} = 0,358 \cdot So^3 - 2,0889 \cdot So^2 + 3,4544 \cdot So + 0,162 \text{ для } 1,5 \leq So \leq 2,4$$

при  $R^2=0,9995$ ,

(30)

де  $So$  – вміст соапстоку в субстраті, %.

Функції (26) і (27) різко змінюють кут нахилу, внаслідок чого додавання косубстрату викликає різке зменшення швидкості зростання виходу біогазу. Для унеможливлення перевитрати косубстрату раціональним є додавання 0,75 % сирого гліцерину і 30 % мелясної барди до субстрату на основі гною великої рогатої худоби. Функції (28), (29) і (30) були досліджені на екстремум  $V_{\text{б.мод}} \rightarrow \max$  методом градієнтного спуску. Встановлено, що для системи приготування і дозування субстрату метантенка біогазової установки оптимальними є заміна 55,3 % води на сироватку при приготуванні субстрату на основі гною великої рогатої худоби, додавання до субстрату 3,2 % борошна і 1,3 % соапстоку.

Отже, в результаті експериментальних досліджень інтенсифікації виходу біогазу із застосуванням косубстратів отримано динаміки виходу біогазу при періодичному завантаженні метантенка, які було використано для визначення коефіцієнтів математичної моделі (4). На їх основі розроблено класифікацію сировини по виходу біогазу, яка дозволить при проектуванні біогазової установки в господарстві вибирати доступну сировину для використання в якості косубстратів. На основі отриманих динамік виходу біогазу при періодичному завантаженні метантенка проведено моделювання постійного виходу біогазу при поступовому завантаженні метантенка. Отримані моделі стали базою для встановлення раціональних і оптимальних концентрації косубстратів у субстраті на основі гною великої рогатої худоби, знаючи які,

можна здійснювати проектування основних вузлів системи приготування і дозування субстрату біогазової установки.

Для визначення конструктивно-технологічних параметрів вузла гранулювання гранулятора для виробництва деревних паливних гранул у приватному підприємстві «Малинська меблева фабрика» експериментально визначено середню щільність сировини, яка становить  $149,1 \text{ кг/м}^3$ .

У п'ятому розділі «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання для виробництва та очищення біопалива і впровадження результатів дослідження у виробництво» розроблено методики та на основі технологічних параметрів, отриманих у результаті теоретичних і експериментальних досліджень, здійснено обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання для очищення біодизеля, приготування і дозування субстрату біогазової установки, виробництва паливних гранул з біомаси.

Для лінії виробництва дизельного біопалива ЛВДБ-ЕКО-БІО-1.25.5.Р (рис. 17) за розробленою методикою здійснено обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів реакторів для нейтралізації і очищення біодизеля (на рис. 17 обведені жирною штриховою лінією).

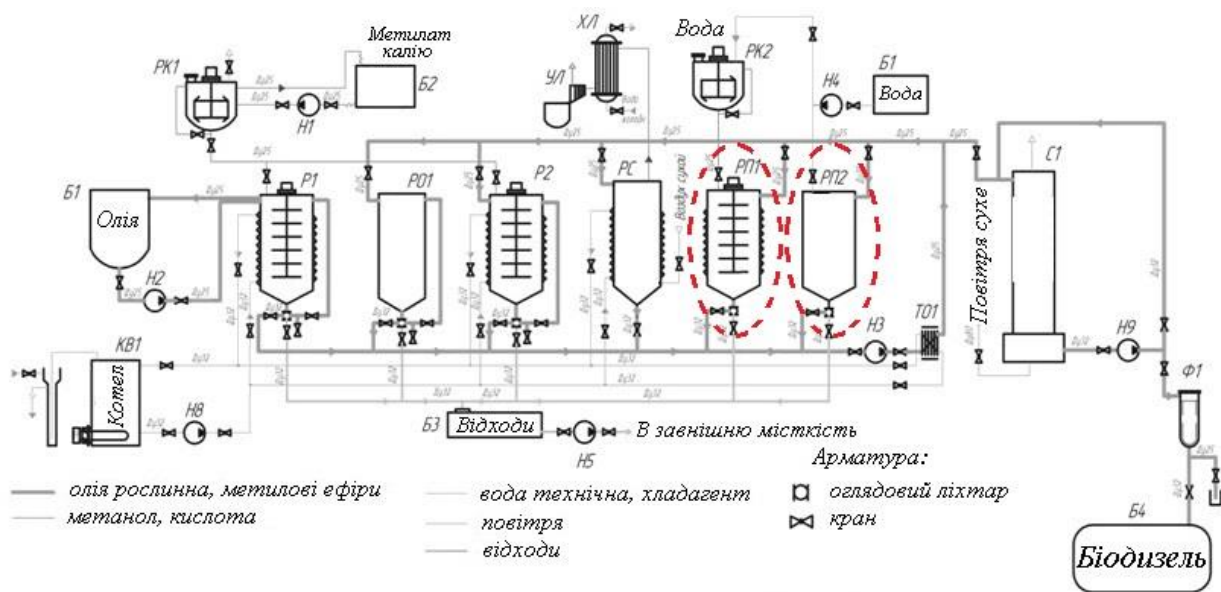


Рис. 17. Схема лінії ЛВДБ-ЕКО-БІО: РК1-РК2 – реактор-змішувач; Р1-Р2 – реактор ділянки естерифікації; Р0 – реактор відстійник; РС – реактор відбирання метанолу; С1 – колона для сушіння біодизеля; РП1 – реактор нейтралізації; РП2 – реактор промивання

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що нейтралізацію біодизеля доцільно здійснювати об'ємним способом за температури  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , промивання – аерозольним за кімнатної температури. Тому реактор для нейтралізації біодизеля повинен бути укомплектований механічною мішалкою і водяною сорочкою, для промивання – вузлом аерозольного розпилювання рідини, а наявність водяної сорочки не обов'язкова (рис. 18). Розраховані за розробленою методикою конструктивно-технологічні

параметри реакторів для нейтралізації і промивання біодизеля такі: внутрішній діаметр обичайки реактора – 0,52 м; висота реактора – 2 м; об’єм реактора – 0,4 м<sup>3</sup>; його конічної частини – 0,0106 м<sup>3</sup>; циліндричної – 0,3926 м<sup>3</sup>; кут при вершині конічного днища – 120°; висота конічної частини реактора – 0,15 м; циліндричної – 1,85 м; товщина стінки циліндричної обичайки, конічного днища і плоскої кришки реактора – 4 мм. Решту конструктивно-технологічних параметрів реакторів наведено в табл. 2.

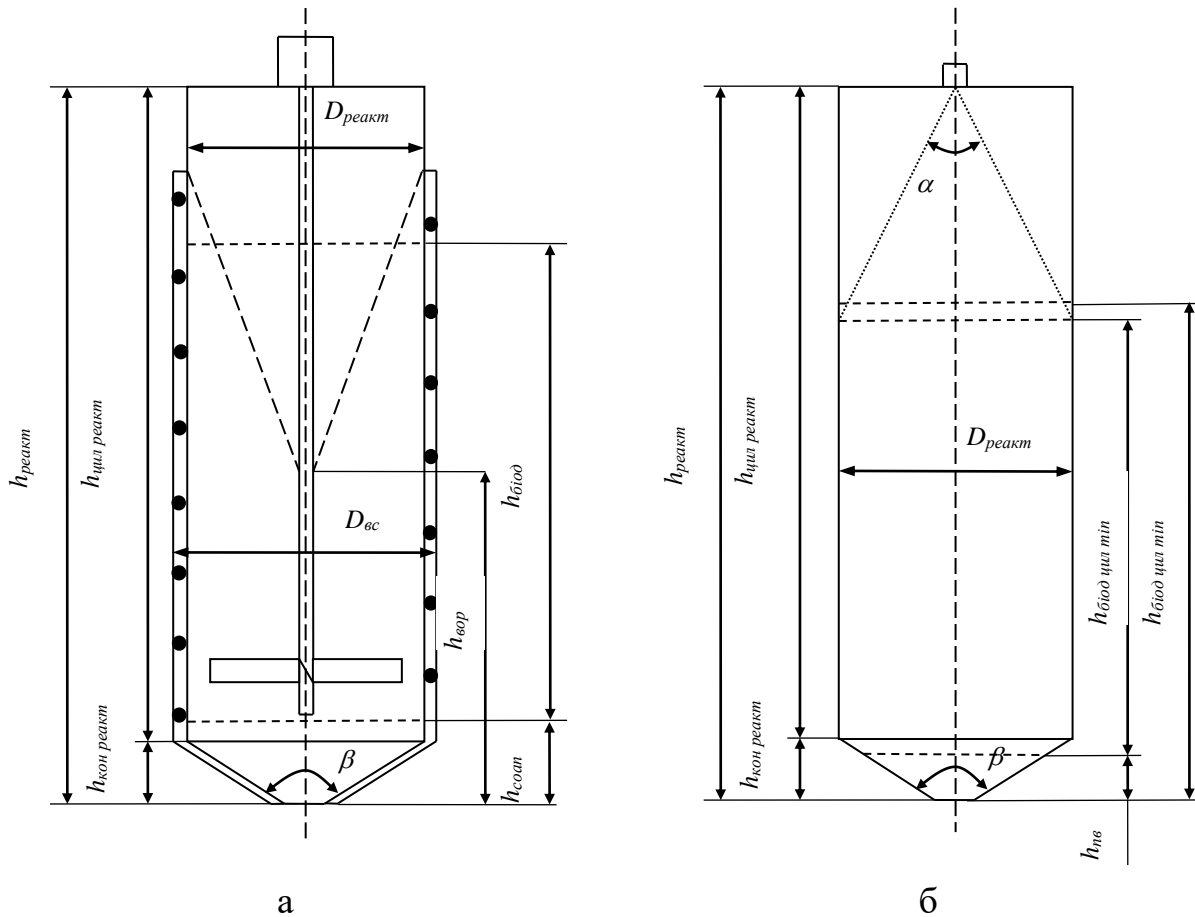


Рис. 18. Схематичне зображення реакторів: а – для нейтралізації біодизеля; б – для промивання біодизеля

У результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна частота обертання валу мішалки при нейтралізації біодизеля становить  $n=323$  об./хв, раціональна – 240–410 об./хв. Нами прийнято трилопатеву мішалку з похилими лопатями (рис. 19), оскільки вона має найменший коефіцієнт опору порівняно з іншими мішалками, що дозволить зменшити глибину воронки, яка утворюється при перемішуванні. За розробленою методикою обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри мішалки: діаметр – 0,1 м; ширина лопаті – 0,02 м; її товщина – 0,003 м; кут нахилу лопатей – 30°. Частота обертання валу мішалки – 310 об./хв (як стандартна для мотор-редукторів). Глибина воронки, яка утворюється при обертанні мішалки, становить 1,03 м, вона не доходить до маточини мішалки, тому її негативна дія на процес перемішування виключається.

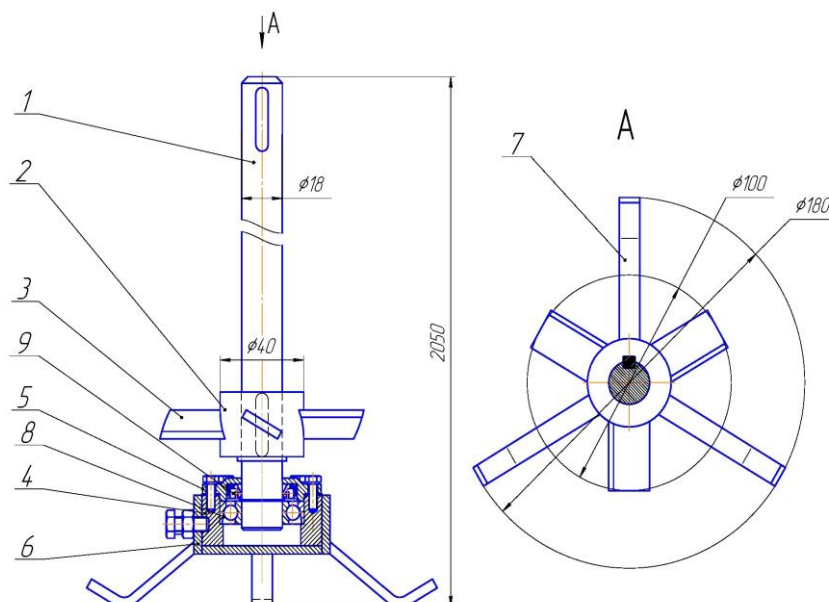


Рис. 19. Трилопатева мішалка з похилими лопатями: 1 – вал; 2 – маточина; 3 – лопать; 4 – корпус підшипника; 5 – кришка; 6 – стакан; 7 – нога; 8 – підшипник; 9 – манжета

Таблиця 2

**Конструктивно-технологічні параметри реакторів для нейтралізації та очищення біодизеля для лінії ЛВДБ-ЕКО-БІО-1.25.5.Р**

Назва параметра	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення для реакторів	
			нейтралізації	промивання
Об'єм реагентів у реакторі	$V_{реак}$	м <sup>3</sup>	0,321	0,3036
Об'єм реагентів у циліндричній частині реактора	$V_{реак\ цил}$	м <sup>3</sup>	0,31	0,293
Коефіцієнт заповнення реактора	$k_{зап}$	–	0,8	0,73
Об'єм реактора, незаповнений реагентами	$V_{ре\ акт\ нез}$	м <sup>3</sup>	0,083	0,0996
Товщина водяної сорочки	$h_{вс}$	мм	6	–
Температурний режим реактора	$T_{реакт}$	°С	40	20
Діаметр водяної сорочки	$D_{вс}$	м	0,62	–
Кут розпилювання промивної води	$\alpha$	°	–	58
Витрата промивної води	$q_{не}$	л/хв.	–	0,78
Висота соапстоку (промивної води) в реакторі	$h_{соап}, h_{не}$	м	0,18	0,135
Висота біодизеля в реакторі:				
– загальна	$h_{бiod}$	м	1,581	–
– мінімальна	$h_{бiod\ цил\ min}$	м	–	1,38
– максимальна	$h_{бiod\ цил\ max}$	м	–	1,417

У результаті теоретичного і експериментального досліджень встановлено, що для ефективного аерозольного промивання біодизеля доцільно застосовувати середньо- і крупнодисперсне розпилення. Для цього використовується вузол аерозольного промивання біодизеля (рис. 20), який складається із розпилювача (відцентровий повноконусний розпилювач «Disc and Core» фірми TeeJet), та встановлюється на кришці реактора промивання.

Для створення середньо- і крупнодисперсного розпилення застосовують турбулізатори DC-33 або DC-56 при робочому тиску 2 Бар. При цьому кут розпилювання становить  $58^\circ$ , а витрата підкисленої води – 0,78 л/хв.

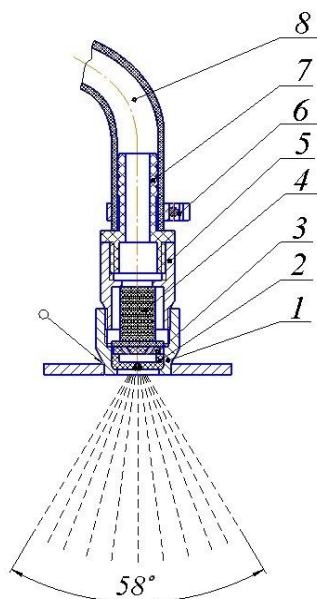


Рис. 20. Вузол аерозольного промивання біодизеля: 1 – гайка; 2 – диск-розпилювач; 3 – турбулізатор; 4 – фільтр; 5 – корпус; 6 – затискач; 7 – ніпель; 8 – шланг

Конструктивно-технологічні параметри системи приготування і дозування субстрату біогазової установки, схематичне зображення якої наведено на рис. 21, для модельного господарства на 1000 голів великої рогатої худоби обґрунтовано за розробленою методикою на основі результатів імітаційного моделювання і експериментальних досліджень виходу біогазу при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням косубстратів.

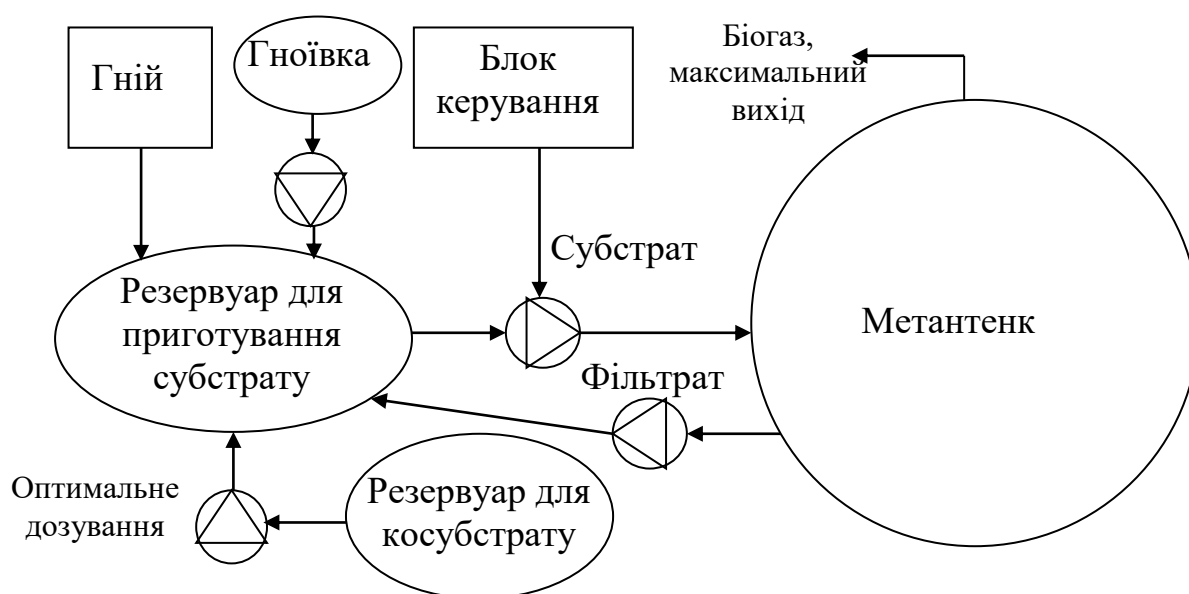


Рис. 21. Схема системи приготування і дозування субстрату біогазової установки

Біогазова установка складається з двох метантенків для бродіння субстрату об'ємом по  $942 \text{ м}^3$  кожний і одного метантенка для його доброджування з таким же самим об'ємом. Діаметр метантенків становить  $13,4 \text{ м}$ ; висота –  $6,7 \text{ м}$ ; з яких  $2,9 \text{ м}$  знаходяться під землею,  $3,8 \text{ м}$  – над землею. Висота субстрату в метантенку дорівнює  $4,0 \text{ м}$ . Добовий обсяг завантаження метантенка субстратом становить  $56,5 \text{ м}^3$ , з яких гній великої рогатої худоби –  $40 \text{ м}^3$ , вода і рідкий косубстрат –  $16,5 \text{ м}^3$ .

Косубстратом до одного метантенка виступає продукт переробки молока – сироватка, до іншого – клітковий сік і мезга, які є відходом виробництва крохмалю.

Резервуари для приготування субстрату і зберігання косубстратів виготовляють з бетону і розміщують у землі на глибині розміщення метантенків –  $2,9 \text{ м}$  (рис. 22).

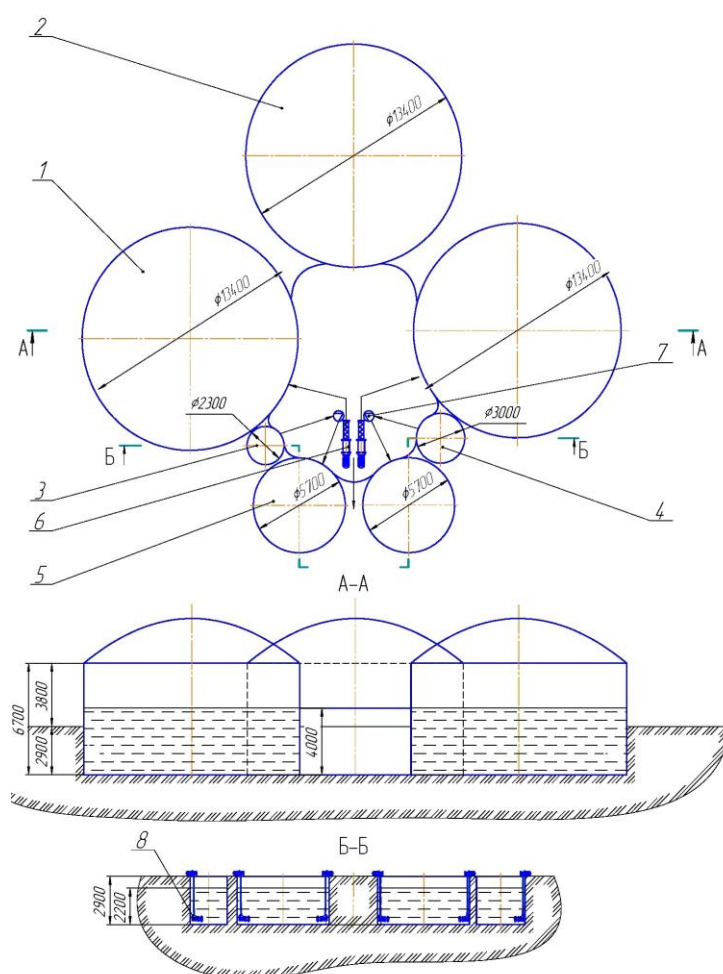


Рис. 22. Схема біогазової установки із системою приготування і дозування субстрату для модельного господарства: 1 – метантенк; 2 – метантенк-доброджувач; 3 – резервуар для сироватки; 4 – резервуар для клітинного соку і мезги; 5 – резервуар для приготування субстрату; 6 – насоси; 7 – прямик

Зверху вони закриваються металевою кришкою, на якій встановлюються пристрої для регулювання занурювальних мішалок, які підтримують субстрат

і косубстрат у гомогенному стані. В кришках є отвори для заливання в резервуари косубстратів з транспортних засобів і аварійного завантаження твердого гною мобільним завантажувачем. Гноївка із ферми в резервуар для приготування субстрату перекачується фекальним насосом. Косубстрати з резервуарів для зберігання косубстратів у резервуар для приготування субстрату подаються відцентровими насосами. Готовий субстрат з резервуарів для приготування субстрату перекачується в метантенки ексцентричними шнековими насосами. Насоси для перекачування косубстратів у резервуари для приготування субстратів і субстратів у метантеки розміщені в приямку, який знаходиться між метантенками і резервуарами для приготування субстрату, і має глибину 2,9 м.

Конструктивно-технологічні параметри резервуарів для приготування субстрату і зберігання косубстратів представлено в табл. 3.

Таблиця 3

**Конструктивно-технологічні параметри резервуарів  
для приготування субстрату і зберігання косубстратів**

Параметр	Значення для резервуарів		
	Приготування субстрату	Зберігання сироватки	Зберігання кліткового соку і мезги
Об'єм субстрату (косубстрату), м <sup>3</sup>	56,4	9,1	16,1
Об'єм резервуару, м <sup>3</sup>	71	11,4	20,1
Діаметр, м	5,7	2,3	3,0

Конструктивно-технологічні параметри вузла гранулювання гранулятора продуктивністю 500 кг/год обґрунтовано за розробленою методикою з використанням отриманої в результаті теоретичного дослідження залежності  $P_{np}=f(2\gamma)$  і вимірної насипної щільності сировини для виробництва паливних гранул. Вузол гранулювання (рис. 23) складається з кільцевої матриці внутрішнім діаметром 300 мм і одного ролика зовнішнім діаметром 166 мм. В матриці є 1342 циліндричні філь'ери діаметром 5,9 мм з конусною верхньою частиною діаметром 7,73 мм, які розміщені в 11 рядів по 122 філь'ери в одному ряду. Довжина філь'ери становить 45 мм, кут при вершині конусної частини філь'ери – 47°. Діаметр отриманих паливних гранул дорівнює 6 мм. Робоча ширина ролика і матриці становить 83 мм, частота обертання матриці – 250 об./хв, потужність привода гранулятора з врахуванням буксування роликів повинна становити не менше 24 кВт.

Гранулятор з розробленим вузлом гранулювання (обведений жирною штриховою лінією) входить до складу лінії виробництва паливних гранул (рис. 24).

Технологію промивання біодизеля і обладнання аерозольного промивання біодизеля для лінії виробництва дизельного біопалива типу ЛВДБ-ЕКО-БЮ впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «ГАН», конструкція вузла аерозольного промивання біодизеля – в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Укрекспо-Процес».

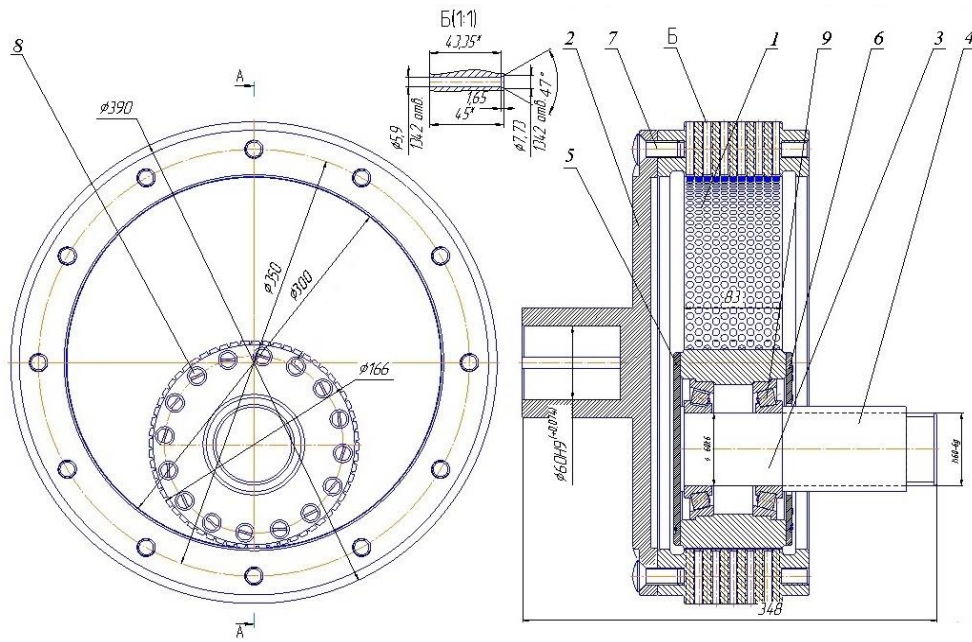


Рис. 23. Вузол гранулювання із спроектованою матрицею: 1 – матриця; 2 – корпус; 3 – вісь; 4 – втулка; 5, 6 – шайба; 7, 8 – гвинт; 9 – підшипник

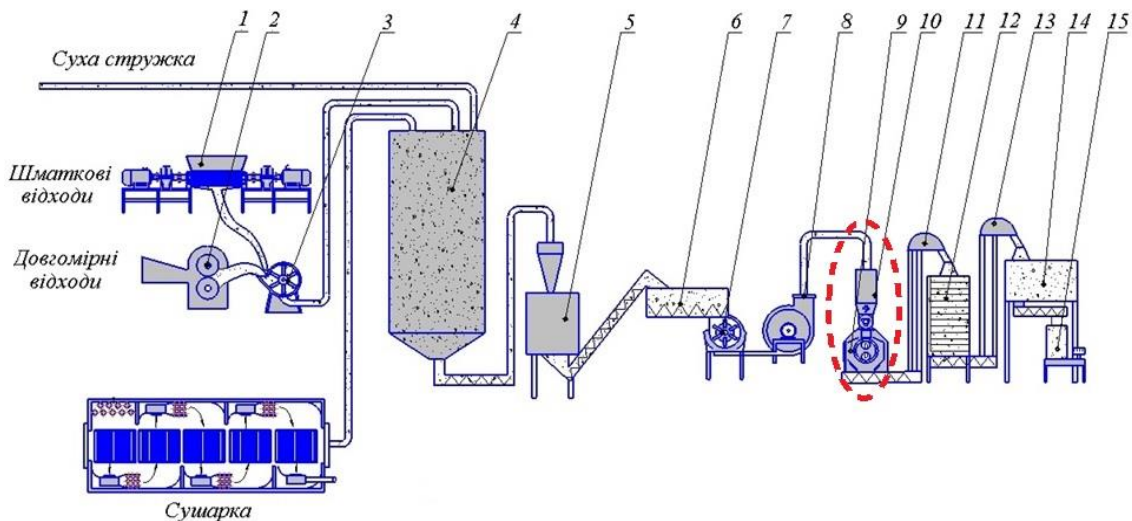


Рис. 24. Лінія виробництва паливних гранул: 1 – валково-зубчаста дробарка попереднього дроблення; 2 – дискова дробарка попереднього дроблення; 3 – молоткова дробарка попереднього дроблення; 4 – бункер для зберігання подрібненої сировини; 5 – проміжний бункер для сировини; 6, 10 – дозатор; 7 – молоткова дробарка кінцевого дроблення; 8 – пневмотранспортер; 9 – гранулятор; 11, 13 – норія; 12 – охолоджувач гранул; 14 – бункер-накопичувач гранул; 15 – пакувальна машина

Для Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» розроблено технічні умови ТУ У 29.2 – 14247520-006:2008 «Лінії виробництва дизельного біопалива типу ЛВДБ-ЕКО-БІО», згідно із якими впроваджено лінію промислового виробництва дизельного біопалива із розробленими реакторами для нейтралізації і промивання біодизеля. Науково-практичні рекомендації та

технології отримання біогазу із застосуванням косубстратів впроваджено в товариствах з обмеженою відповідальністю «ГАН» (сирий гліцерин) і «Бітеко-Біогаз» (сироватка і мелясна барда). Методику розрахунку конструктивно-технологічних параметрів машин та обладнання для виробництва паливних гранул і технології виробництва деревних паливних гранул і гранул з біомаси впроваджено в приватному підприємстві «Малинська меблева фабрика». Технологію та обладнання комплексного виробництва і використання біопалив впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Сріблянка-Агро». Результати дисертації впроваджено в навчальному процесі механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України. Міністерством аграрної політики та продовольства України затверджено рекомендації для агропромислових підприємств України «Способи підвищення ефективності виробництва дизельного біопалива із заданими показниками якості» і «Технології переробки органічних відходів з виробництвом біогазу в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція».

У шостому розділі **«Економічне обґрунтування впровадження технологій та комплексу машин і обладнання для виробництва та використання біопалива у сільському господарстві»** удосконалено концепцію функціонування агробіоінженерної системи з впровадженням технологій та комплексу машин і обладнання для виробництва та використання біопалива, згідно з якою необхідно:

- збільшити долю тваринництва в господарствах не менше як до 50 %, що сприятиме вирішенню проблеми відновлення родючості ґрунтів та збільшенню виходу товарного молока;

- використовувати не менше 60–70 % рослинних решток після збирання урожаю шляхом їх заробки у верхні шари ґрунту разом з гноєм, гноївкою, дигестатом або азотними добривам, що в доповнення до попереднього пункту забезпечить відновлення родючості ґрунтів;

- розширити площі кормових культур з розрахунку 1 га на одну товарну корову, що вирішить проблему забезпечення тваринництва кормами;

- впровадити часткову переробку сільськогосподарської продукції безпосередньо в господарстві, що дозволить знизити рівень безробіття в сільському господарстві, «омолодити» село, вирішити проблему утилізації відходів переробних підприємств, зменшити транспортні витрати;

- забезпечити енергетичну автономність господарств та сільських громад шляхом впровадження комплексних екобезпечних технологій та обладнання виробництва і використання біопалива безпосередньо в господарстві із існуючих ресурсів і відходів.

Концепцію функціонування агробіоінженерної системи із впровадженням технологій і комплексу машин та обладнання виробництва та використання біопалива апробовано на модельному господарстві (1840 га сільськогосподарських угідь, стадо 1000 голів великої рогатої худоби) та визначено її економічну ефективність (рис. 25).



Основний прибуток господарство отримує від експлуатації біогазової установки у складі 1–2 метантенків, метантенка-доброджувача, системи приготування і дозування субстрату і когенераційної установки. Гній великої рогатої худоби добре зброджується в біогазових установках, однак, дає відносно невелику кількість біогазу. Щоб покращити вихід біогазу через систему приготування і дозування субстрату біогазової установки до гною великої рогатої худоби додають косубстрати. Частину косубстратів (сирий гліцерин, фуз, соапсток) можна отримати при виробництві біодизеля з 12 га посівів ріпаку, який буде використовуватися для виготовлення 5 % сумішевого дизельного біопалива. В якості косубстратів можна також використовувати харчові відходи з їдальні. Однак, вказаних косубстратів недостатньо. Тому для отримання значних кількостей косубстратів у господарстві доцільно впроваджувати переробні виробництва. При цьому частково вирішується проблема зайнятості населення. У випадку модельного господарства здійснюється переробка молока (90 %) на молокопродукти та переробка картоплі (з 368 га) на крохмаль. Господарство отримує чистий прибуток від функціонування переробних підприємств, а також відходи (сироватка, мезга, клітинний сік), які забезпечують біогазову установку високопродуктивними косубстратами. Це дозволить отримати щорічний прибуток 46,5 млн грн/рік та забезпечити термін окупності біогазової установки 6,4 роки порівняно з майже 9 роками при зброджуванні лише одного гною великої рогатої худоби. Отриманий дигестат біогазової установки разом із 70 % рослинних залишків використовується для відновлення продуктивності ґрунту. Частина соломи і стебел кукурудзи (30 %) заготовлюються у вигляді тюків або рулонів, які спалюються в котлі. Теплова енергія використовується для теплозабезпечення адміністративних, виробничих та житлових споруд. Гранули або брикети, виготовлені з міскантуса, можна продавати населенню за доступними цінами. Економія від заміни природного газу на біопаливо щорічно сягатиме майже 4,5 млн грн, прибуток від продажу населенню паливних гранул або брикетів – понад 1 млн грн.

Впровадження концепції функціонування агробіоінженерної системи з застосуванням технологій та комплексу машин і обладнання для виробництва та використання біопалива у господарстві молочно-зернового напрямку дозволить мати перевищення прибутку над господарством зернового напрямку 34 млн грн/рік при врожайності пшениці 40 ц/га.

Концепцію функціонування агробіоінженерної системи з застосуванням системи технологій, машин та обладнання виробництва та використання біопалив впроваджено у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Біомаса-Карбон».

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування та вирішення науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в розробленні моделей і методів техніко-технологічного обґрунтування системи виробництва і використання біопалива в сільському господарстві. Основні наукові та практичні результати полягають в наступному.

1. Проведений аналіз сучасного стану світового та вітчизняного паливно-енергетичного комплексу показав, що ресурси основних викопних палив, які сьогодні є головним джерелом енергії, вичерпуються. Альтернативні викопні палива в Україні на даний час не розробляються. Виходячи із вищевказаного, доцільно використовувати біопалива, які є відновлюваним і більш екологічно чистим ресурсом: біомаса, відходи тваринництва, рослинництва і переробних галузей.

2. Для обґрунтування техніко-технологічних вимог до системи промивання біодизеля розроблено математичну модель аерозольного очищення, за якою здійснювати промивання біодизеля рекомендовано шляхом аерозольного розпилювання над ним крапель води діаметром 500–1000 мкм. При цьому час осадження одиничного забруднювача не перевищує 2 хв. У випадку зниження дисперсності крапель швидкість їх осадження суттєво збільшується, подальше збільшення їх діаметра несуттєво впливає на швидкість осадження.

3. Удосконалено математичну модель функціонування біогазової установки шляхом оптимізації її параметрів на основі даних експериментальних досліджень динаміки виходу біогазу з отриманням коефіцієнтів, які залежать від виду косубстрату. Отримано рівняння регресії, які пов'язують коефіцієнти математичної моделі функціонування біогазової установки з температурним режимом і концентрацією косубстратів.

4. Математичне моделювання процесу гранулювання біомаси дозволило встановити оптимальний кут при вершині конусної частини філь'єри за умови зниження енергозатрат на пресування, який становить  $26^\circ$  при висоті шару сировини, що захоплюється роликком під час пресування – 1 мм,  $32^\circ$  – при 2 мм,  $41^\circ$  – при 3 мм,  $59^\circ$  – при 4 мм,  $109^\circ$  – при 5 мм,  $122^\circ$  – при 6 мм,  $131^\circ$  – при 7 мм. Отримано рівняння регресії залежності оптимального кута при вершині конусної частини філь'єри від висоти шару сировини, що захоплюється роликком під час пресування. За розробленою методикою за допомогою отриманого рівняння регресії і вимірної щільності сировини для виробництва паливних гранул, яка становить  $149,1 \text{ кг/м}^3$ , розроблено конструкцію вузла гранулювання, який складається з кільцевої матриці внутрішнім діаметром 300 мм і одного ролика зовнішнім діаметром 166 мм. В матриці є 1342 циліндричні філь'єри діаметром 5,9 мм з кутом при вершині конусної частини  $47^\circ$ , які розміщені в 11 рядів по 122 філь'єри в одному ряді. Частота обертання матриці – 250 об./хв.

5. Експериментально встановлено, що нейтралізацію біодизеля доцільно здійснювати об'ємним способом при температурі  $40^\circ\text{C}$  і раціональній частоті обертання валу мішалки 240–410 об./хв (оптимальна частота – 323 об./хв), промивання біодизеля – аерозольним способом при середньо- та крупнодисперсному розпилюванні води протягом не менше 5 год. За розробленою методикою обґрунтовано конструкції реакторів для нейтралізації та промивання біодизеля, які відрізняються наявністю водяної сорочки та трилопатевої мішалки з похилими лопатями діаметром 0,1 м з частотою обертання 310 об./хв у реакторі для нейтралізації та вузла аерозольного промивання на основі повноконусного відцентрового розпилювача з кутом

розпилу 58° у реакторі для промивання. Розроблено методичні засади та обґрунтовані параметри мішалки реактора для нейтралізації біодизеля.

6. На основі експериментальних досліджень отримано рівняння регресії, які пов'язують величину виходу біогазу з вмістом косубстратів у субстраті на основі гною великої рогатої худоби. Шляхом дослідження їх на екстремум встановлено, що оптимальним є заміна 55,3 % води на сироватку при приготуванні субстрату на основі гною великої рогатої худоби, додавання до субстрату 3,2 % борошна і 1,32 % соапстоку; раціональним – 0,75 % сирого гліцерину і 30 % мелясної барди. Розроблено методику класифікації сировини по виходу біогазу, на основі якої обґрунтовано конструкцію вузла приготування і дозування субстрату для біогазової установки на два метантенки об'ємом 942 м<sup>3</sup>, яка складається з двох резервуарів для приготування субстрату об'ємом по 71 м<sup>3</sup> при діаметрі 5,7 м і двох резервуарів для зберігання косубстратів: об'ємом 11 м<sup>3</sup> при діаметрі 2,3 м для сироватки і об'ємом 20 м<sup>3</sup> при діаметрі 3 м для кліткового соку і мезги. Всі резервуари підземні, їх висота становить 2,9 м.

7. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень удосконалено технологічний процес виробництва біодизеля шляхом застосування обладнання для його нейтралізації об'ємним способом, для промивання – аерозольним способом; технологічний процес виробництва біогазу – за рахунок впровадження обладнання в систему приготування і дозування субстрату для використання косубстратів, які підвищують вихід біогазу.

8. За результатами економічного обґрунтування впровадження технологій та комплексу машин і обладнання виробництва та використання біопалив у сільському господарстві встановлено, що найбільший економічний ефект від їх впровадження можна досягти в господарствах молочно-зернового напрямку – перевищення прибутку над господарством зернового напрямку 34 млн грн/рік при врожайності пшениці 40 ц/га. Результати дисертаційної роботи прийняті до впровадження у виробництво в товариствах з обмеженою відповідальністю "ТАН", "Укрекспо-Процес", "Сріблянка-Агро", "Біомаса-Карбон" "Бітеко Біогаз", приватному підприємстві "Малинська меблева фабрика", виробничому підрозділі НУБіП України "Агрономічна дослідна станція" та у навчальний процес НУБіП України.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії

1. **Поліщук В. М.,** Войтюк В. Д. Процеси, машини та обладнання виробництва твердих і рідких біопалив: [монографія]. К., 2018. 588 с. *(Здобувачем досліджено сучасний стан світового та вітчизняного паливно-енергетичного комплексу, відомі біопалива, технології та технічні засоби отримання біопалива, способи та технічні засоби виробництва і очищення біодизеля, розроблено математичну модель аерозольного промивання біодизеля, програму та методику експериментальних досліджень способів покращання якості біодизеля, в результаті яких встановлено оптимальні*

спосіб та параметри його очищення, розроблено конструкцію вузла для аерозольного очищення біодизеля).

2. **Поліщук В. М.**, Шворов С. А., Войтюк В. Д., Мірошник В. О. Процеси, системи та обладнання виробництва біогазу: [монографія]. К., 2019. 556 с. *(Здобувачем здійснено моделювання процесу генерування біогазу, проведено експериментальні дослідження виходу біогазу та здійснено обробку їх результатів, розроблено методичні засади комплексного виробництва і використання біопалив в Україні).*

#### **Статті у наукових фахових виданнях України:**

3. Поліщук В. М. Способи застосування біопалив в народному господарстві (Узагальнення досвіду). Науковий вісник Національного аграрного університету. 2008. № 125. С. 257–267.

4. **Поліщук В. М.**, Лобастов І. В., Мороз А. І. Моделювання собівартості вирощування зернових культур. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2009. № 134. Ч. 2. С. 59–69. *(Здобувачем здійснено моделювання собівартості вирощування зернових культур для енергетичних цілей).*

5. **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є., Гуменюк І. Д., Яструб М. М., Поліщук О. В. Технології виробництва біодизеля (Огляд). Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. № 144. Ч. 3. С. 354–359. *(Здобувачем досліджено технології виробництва біодизеля).*

6. Поліщук В. М. Тваринні та рослинні жири як сировина для виробництва біодизелю (Узагальнення досвіду). Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. № 144. Ч. 3. С. 198–218.

7. **Поліщук В. М.**, Білько Т. О. Сучасний стан світового та вітчизняного паливно-енергетичного комплексу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 170. Ч. 1. С. 209–219. *(Здобувачем досліджено сучасний стан паливно-енергетичного комплексу).*

8. Поліщук В. М. Основи виробництва біоетанолу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 170. Ч. 2. С. 252–258.

9. **Поліщук В. М.**, Василенков В. Є., Лободко М. М., Волошин В. С. Експрес-метод визначення теплотворної здатності біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 170. Ч. 2. С. 258–263. *(Здобувачем розроблено експрес-метод визначення теплотворної здатності біогазу).*

10. **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є., Поліщук О. В. Аналоги дизельного палива із викопної сировини. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК.

2012. № 174. Ч. 1. С. 141–144. *(Здобувачем досліджено існуючі дизельні палива із викопної сировини).*

11. Поліщук В. М. Ефективність використання твердого біопалива в Україні. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2013. Вип. 97. Т. 2. С. 47–51.

12. Поліщук О. В., Козак Н. І., **Поліщук В. М.**, Білецький А. В. Методика потенціометричного титрування. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. 2014. № 1 (39). Т. 1. С. 204–211. *(Здобувачем розроблено методику визначення лужності біодизеля).*

13. **Поліщук В. М.**, Дубровін В. О., Поліщук О. В. Енергетичний баланс метантенка біогазової установки ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Механізація та електрифікація сільського господарства. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 114–124. *(Здобувачем досліджено енергетичний баланс метантенка біогазової установки).*

**Статті у наукових фахових виданнях України,  
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

14. **Поліщук В. М.**, Лободко М. М., Дубровіна О. В. Біотехнологічні основи виробництва біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. № 185. Ч. 2. С. 289–296. *(Здобувачем досліджено процес метанового бродіння при періодичному завантаженні субстрату).*

15. **Поліщук В. М.**, Лободко М. М., Сидорчук О. В., Поліщук О. В. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. № 185. Ч. 3. С. 180–191. *(Здобувачем розроблено методику та проведено експериментальні дослідження впливу виду субстрату, його температури та перемішування на вихід біогазу).*

16. **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є. Удосконалена методика конструктивно-технологічного розрахунку молоткової дробарки для лінії гранулювання біомаси. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 196. Ч. 1. С. 428–436. *(Здобувачем удосконалено методику конструктивно-технологічного розрахунку молоткової дробарки для лінії гранулювання біомаси).*

17. Поліщук В. М. Собівартість насіння олійних культур для переробки в біодизель. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 196. Ч. 2. С. 50–57.

18. Дубровін В. О., **Поліщук В. М.**, Лободко М. М., Крусір Г. В., Соколова І. Ф. Підвищення ефективності виробництва біогазу за рахунок використання стічних вод виноробних виробництв. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія:

Техніка та енергетика АПК. 2014. № 196. Ч. 3. С. 28–33. *(Здобувачем розроблено методику та проведено експериментальні дослідження зброджування гною великої рогатої худоби з додаванням стічних вод виноробних виробництв при періодичному завантаженні, рекомендовано доля стічних вод виноробних виробництв у субстраті).*

19. Крусир Г. В., Дубровин В. А., **Поліщук В. Н.**, Дубовик А. А., Соколова И. Ф. Исследование метаногенеза сточных вод предприятий первичного виноделия. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 4. № 10 (70). С. 43–47. *(Здобувачем досліджено стічні води первинного виноробства, запропоновано використання метанового зброджування для їх очищення).*

20. **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є. Собівартість зберігання насіння олійних культур. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 212. Ч. 1. С. 179–186. *(Здобувачем встановлено залежність собівартості зберігання насіння олійних культур від їх вологості і засміченості).*

21. **Поліщук В. М.**, Дубровин В. О., Лободко М. М., Поліщук О. В. Дослідження процесу поступової подачі субстрату в біогазовий реактор. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 212. Ч. 1. С. 158–163. *(Здобувачем розроблено методику та проведено експериментальні дослідження зброджування субстрату при поступовому завантаженні, розроблено математичну модель, на основі якої здійснено прогноз виходу біогазу залежно від доли змінюваного субстрату).*

22. Поліщук О. В., Козак Н. І., **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є. Дослідження параметрів і режимів об'ємного промивання біодизеля. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 251. С. 95–99. *(Здобувачем розроблено методику та проведено дослідження об'ємного промивання біодизеля, встановлено незадовільний вплив даного способу промивання на якість біодизеля).*

23. **Поліщук В. М.**, Козак Н. І. Аналіз типів розпилювачів для аерозольного промивання біодизеля. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 254. С. 94–104. *(Здобувачем досліджено розпилювачі для аерозольного промивання біодизеля, на основі якого рекомендовано застосовувати відцентрові повноконусні розпилювачі).*

24. Поліщук В. М. Сучасний стан основних світових та вітчизняних викопних паливно-енергетичних ресурсів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 275. С. 252–270.

25. **Polishchuk V.**, Golopura S., Biletskii V., Styrankevych G. National-economy application of diesel biofuels. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та

енергетика АПК. 2018. Вип. 297. С. 123–127. *(Здобувачем проаналізовано біопаливо для дизельних двигунів).*

26. **Поліщук В. М.**, Науменко В. О., Науменко О. В. Впровадження технологічної лінії виробництва паливних гранул із відходів деревообробки і меблевого виробництва на ПП «Малинська меблева фабрика». Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 296. С. 117–122. *(Здобувачем визначено сировинну база для виробництва паливних гранул на приватному підприємстві «Малинська меблева фабрика», розроблено технологічну схему лінії виробництва паливних гранул).*

27. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Ільтьо В. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів мішалок метантенка біогазової установки. Енергетика і автоматика. 2018. № 3. С. 61–74. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10900> *(Здобувачем наведено методичні засади та проведено обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів перемішуючих пристроїв субстрату в метантенках біогазової установки Рокитнянського цукрового заводу).*

28. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Давиденко Т. С. Інтенсифікація процесу метанового бродіння в біогазових установках на основі використання мелясної барди. Енергетика і автоматика. 2019. № 1. С. 37–44. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/energiya2019.01.037/11100> *(Здобувачем розроблено методичні засади та отримано результати експериментальних досліджень виходу біогазу при збродженні мелясної барди).*

29. Поліщук В. М. Концепція розвитку сільських територій із впровадженням комплексних екобезпечних технологій виробництва і використання біопалив. Machinery & Energetics. Journal of Production Research. 2019, Vol. 10, No 2. С. 79-84.

#### **Статті у наукових виданнях інших держав:**

30. Polischuk V. Технології виробництва рослинної олії для використання в енергетичних цілях. MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. 2010. Vol. 12 В. Р. 177–182.

31. **Polischuk V.**, Tarasenko S., Sergeyeva O. Конструктивні особливості метантенків. MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. 2011. Vol. 13 В. Р. 56–61. *(Здобувачем досліджено конструкції метантенків біогазових установок).*

32. **Полищук В.**, Дубровин В., Полищук А. Альтернативные дизельные топлива. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2012. Vol. 14. No 3. Р. 20–32. *(Здобувачем досліджено існуючі дизельні палива із відновлюваних ресурсів).*

33. **Полищук В.**, Лободко Н., Полищук А. Использование отходов биодизельного производства для повышения производительности биогазовых установок. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture.

2014. Vol. 16. No 3. P. 110–117. (Здобувачем розроблено методику, проведено експериментальні дослідження, встановлено оптимальні параметри та розроблено математичну модель виходу біогазу при зброджуванні гною великої рогатої худоби з додаванням сирого гліцерину).

34. Полищук А., Козак Н., **Полищук В.** Определение эффективности нейтрализации биодизеля путем распыления водного раствора лимонной кислоты. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2015. Vol. 17. No 3. P. 202–207. (Здобувачем розроблено методику, проведено експериментальні дослідження та зроблено висновок про ефективність нейтралізації біодизеля шляхом розпилення водного розчину лимонної кислоти).

35. Polishchuk A., Drahniev S., **Polishchuk V.** Theoretical foundation of biodiesel flushing. Mechanization in agriculture. 2015. Iss. 12. P. 39–41. (Здобувачем розроблено математичну модель процесу аерозольного промивання біодизеля).

36. Полищук В. Н. Себестоимость производства биодизеля. Мир науки и инноваций. 2016. Вып. 1 (3). Т. 7. С. 78–81.

37. **Polishchuk V.**, Bilko T. Research of influence of species of raw material on biogas output. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2017. Vol. 19. No 3. P. 73–80. (Здобувачем розроблено методику та описано результати проведених експериментальних досліджень впливу виду субстрату, його температури та перемішування на вихід біогазу).

38. **Polishchuk V.**, Lobodko M., Bobyr M. Research of biogas methane fermentation of after alcohol bard. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2017. Vol. 19. No 3. P. 57–64. (Здобувачем розроблено методику визначення впливу концентрації післяспирової барди в субстраті на вихід біогазу).

39. Romaniuk W., **Polishchuk V.**, Marczuk A., Titova L., Rogovskii I., Borek K. Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. Agricultural Engineering. 2018. Vol. 22. No 1. P. 105–125. (Здобувачем розроблено методику, описано результати експериментальних досліджень та надано рекомендації щодо використання фільтрату для підвищення урожайності та екологічності продукції овочівництва).

40. **Polishchuk V.**, Naumenko V., Naumenko O. Justification of capacity of the pellets granulation line at private enterprise «Malyn furniture factory». Тека. Commission of motorization and power industry in agriculture. 2018. Vol. 18. No 1. P. 83–93. (Здобувачем обґрунтовано продуктивність лінії виробництва деревних паливних гранул в приватному підприємстві «Малинська меблева фабрика»).

#### Статті в інших наукових виданнях:

41. **Поліщук В. М.**, Білик І. О., Драгнєв С. В., Поліщук О. В. Проблеми розвитку виробництва дизельного біопалива в Україні. Продуктивність

агропромислового виробництва. 2007. Вип. 6. С. 110–117. *(Здобувачем доведено необхідність розвитку виробництва біодизеля в Україні).*

42. Поліщук В. М. Економічні показники виробництва та використання дизельних біопалив. Продуктивність агропромислового виробництва. 2008. Вип. 11. С. 65–68.

43. Поліщук В. М. Техніко-технологічні аспекти виробництва біодизельного пального. Вісник аграрної науки. 2010. № 11. С. 41–42.

44. **Поліщук В. М.**, Козак Н. І., Поліщук О. В. Дослідження параметрів і режимів аерозольного промивання біодизеля. Техніка і технологія в АПК. 2015. № 11 (74). С. 20–21. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та встановлено параметри аерозольного промивання біодизеля).*

45. Полищук В. Н., Захарчук Б. В. Анализ показателей качества дизельного биотоплива согласно отечественных и мировых стандартов. Научный взгляд в будущее. 2016. Вып. 4. Т. 2. С. 54–56. *(Здобувачем проведено аналіз показників якості біодизеля згідно вітчизняних та світових стандартів).*

#### **Патенти України на корисну модель:**

46. Дубровін В. О., **Поліщук В. М.**, Лободко М. М., Сидорчук О. В., Поліщук О. В., Козак Н. І. Патент на корисну модель 88991 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № у 201312214; заявлено 18.10.2013; опубліковано 10.04.2014; Бюл. № 7. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання сирого гліцерину до субстрату).*

47. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134233 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № у 201811876; заявлено 03.12.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 1,3 % фузу до субстрату).*

48. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134234 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № у 201811877; заявлено 03.12.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 40 % кисломолочної сироватки до субстрату).*

49. Шворов С. А., Фльонц І. В., **Поліщук В. М.**, Троханяк В. І. Патент на корисну модель 134306 Україна, МПК С02F 11/04, С02F 101/30, С02F 103/26 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № у 201812331; заявлено 11.12.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано використовувати в якості косубстрату солому).*

50. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134183 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природо-користування України. № u 201811061; заявлено 09.11.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 2,3 % борошна до субстрату).*

51. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134184 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природо-користування України. № u 201811062; заявлено 09.11.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 5 % крохмалю до субстрату).*

52. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134185 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природо-користування України. № u 201811063; заявлено 09.11.2018; опубліковано 10.05.2019; Бюл. № 9. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 1,2 % соапстока до субстрату).*

53. Шворов С. А., **Поліщук В. М.**, Лендел Т. І. Патент на корисну модель 134523 Україна, МПК С02F 11/04 (2006.01). Спосіб інтенсифікації виходу біогазу; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природо-користування України. № u 201811878; заявлено 03.12.2018; опубліковано 27.05.2019; Бюл. № 10. *(Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації виходу біогазу шляхом додавання 10,6 % м'якої барди до субстрату).*

#### **Навчальні посібники:**

54. Поліщук В. М. Процеси та обладнання біотехнологічного виробництва газових біопалив: [навчальний посібник]. К., 2015. 244 с.

55. Дубровін В. О., **Поліщук В. М.**, Тарасенко С. Є., Драгнєв С. В. Практикум з машин та обладнання для біоенергетики: [навчальний посібник]. К., 2013. 208 с. *(Здобувачем досліджено технології та технічні засоби виробництва біогазу та гранульованого біопалива і розроблено методики визначення конструктивно-технологічних параметрів вузлів перемішування в метантенку, подрібнення – в дробарці і гранулювання – в грануляторі).*

#### **Науково-методичні рекомендації:**

56. Дубровін В. О., **Поліщук В. М.**, Гринько П. В., Бурилко А. В., Драгнєв С. В., Козак Н. І., Поліщук О. В., Павленко М. Ю. Способи підвищення ефективності виробництва дизельного біопалива із заданими показниками якості: рекомендації для агропромислових підприємств України. К., 2014. 100 с. *(Здобувачем досліджено технології та технічні засоби виробництва та очищення дизельного біопалива, розроблено математичну модель аерозольного промивання та рекомендовано технічні засоби для його здійснення, розроблено програму та методику експериментальних досліджень способів покращення якості метилового ефіру та в результаті експериментальних досліджень*

*встановлено оптимальні спосіб та параметри очищення біодизеля, досліджено технічні засоби та розроблено конструкція вузла для аерозольного очищення біодизеля).*

57. Дубровін В. О., **Поліщук В. М.**, Голуб Г. А., Гринько П. В., Бурилко А. В., Лободко М. М., Козак Н. І., Поліщук О. В. Технології переробки органічних відходів з виробництвом біогазу в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція»: рекомендації для агропромислових підприємств України. К., 2014. 268 с. *(Здобувачем досліджено способи переробки органічних відходів, технології та технічні засоби виробництва біогазу, розроблено програму та методичку, наведено результати експериментальних досліджень залежності виходу біогазу від температурного режиму та вмісту різних косубстратів, досліджено вплив рідкого дигестату на урожайність та екологічність продукції рослинництва, визначено конструктивно-технологічні параметри метантенка для біогазової установки ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», встановлено ефективність виробництва та використання біогазу в умовах ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція»).*

#### **Тези наукових доповідей:**

58. Поліщук В. М. Оцінка впливу режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. Технічний прогрес у сільсько-господарському виробництві: ХХ Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха, 22–24 травня 2012 року: тези доповіді. Глеваха, 2012. С. 120–121.

59. Поліщук В. М. Поновлювані джерела енергії в Україні. Екобіотехнології та біопалива в АПК – Energia 2012: VI Міжнародна наукова конференція, м. Київ, м. Люблін, м. Сімферополь, м. Львів, 27 вересня – 3 жовтня 2012 року: тези доповіді. К., 2012. С. 8–9.

60. Поліщук В. М. Оцінка сировинних ресурсів біомаси для виробництва біопалива в Україні. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 11–15 березня 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 44–45.

61. Шворак Д. О., **Поліщук В. М.** Удосконалення конструкції гранулятора з круглою матрицею для виробництва біопалива з відходів деревообробки. Earth bioresources and environmental biosafety: challenges and opportunities (Біоресурси планети та біобезпека навколишнього середовища: проблеми та перспективи): Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 115-річчю НУБіП України та 15-річчю GCHERA, м. Київ, 4–8 листопада 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 78–79. *(Здобувачем досліджено процес виробництва паливних гранул та визначено заходи з удосконалення гранулятора для виробництва паливних гранул).*

62. Сендонін Т. В., **Поліщук В. М.** Оптимізація технології виробництва біогазу. Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів,

м. Київ, 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 333. *(Здобувачем досліджено процес метанового зброджування субстрату).*

63. **Полищук В. Н.**, Дубровин В. А., Силашкин Я. И., Полищук А. В. Дизельные биотоплива. Knowledge Society: Miedzynarodowej naukowopraktycznej konferencji. 30-31 październik 2014 r., m. Łódź: zbior raportow naukowych. Warszawa, 2014. Vol. 7. P. 32–35. *(Здобувачем проведено дослідження існуючих дизельних біопалив).*

64. Поліщук В. М. Енергетичний баланс метантенка біогазової установки ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві: XXII Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха, 21–23 травня 2014 року: тези доповіді 2014. С. 170–171.

65. Поліщук О. В., Козак Н. І., **Полищук В. М.** «Мокрі» способи очищення біодизеля. Наука і життя: сучасні тенденції, інтеграція в світову наукову думку: IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 29–31 травня 2014 року: тези доповіді. 2014. С. 67–72. *(Здобувачем досліджено мокрі способи очищення біодизеля).*

66. **Поліщук В. М.**, Морозюк П. В. Доцільність застосування твердого біопалива в Україні. Альтернативні проблеми сучасної науки: XI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 21–23 жовтня 2014 року: тези доповіді. 2014. С. 72–77. *(Здобувачем досліджено ефективність застосування твердого біопалива в Україні).*

67. Поліщук В. М. Використання стічних вод виноробних виробництв в якості сировини для продукування біогазу. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: V Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2015 рік: тези доповіді. К., 2015. С. 235.

68. Поліщук В. М. Підвищення ефективності виробництва біогазу за рахунок використання стічних вод виноробних підприємств. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XV Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–27 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 100–102.

69. Поліщук В. М. Дослідження процесу поступового подавання субстрату до біогазового реактора. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XV Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–27 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 102–103.

70. Поліщук В. М. Собівартість зберігання насіння олійних культур. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XV Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–27 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 103–105.

71. Поліщук В. М. Собівартість вирощування насіння олійних культур для переробляння у біодизель. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XV Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–27 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 107–108.

72. Поліщук В. М. Вплив шламу біогазових виробництв на урожайність та екологічність продукції овочівництва. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XV Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–27 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 105–107.

73. **Поліщук В. М.**, Козак Н. І., Поліщук О. В., Светлік М. Аналіз типів розпилювачів для аерозольного промивання біодизеля. Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, присвячена 115-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ, 17–19 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 68–69. *(Здобувачем проаналізовано розпилювачі для аерозольного промивання біодизеля).*

74. **Поліщук В. М.**, Козак Н. І., Поліщук О. В., Светлік М. Дослідження параметрів та режимів об'ємного промивання біодизеля. Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, присвячена 115-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ, 17–19 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 69–70. *(Здобувачем розроблено методику та проведено дослідження параметрів та режимів об'ємного промивання біодизеля).*

75. Поліщук В. М. Оптимізація параметрів і режимів продукування біогазу. Інноваційний розвиток аграрної сфери: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 29 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 45–46.

76. Поліщук В. М. Технічні засоби для виробництва біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 4–6.

77. Поліщук В. М. Аналоги дизельного палива із викопної сировини. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 8–9.

78. Поліщук В. М. Експрес-метод визначення теплотворної здатності біогазу. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 13–15.

79. Поліщук В. М. Ефективність використання твердого біопалива в Україні. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних

систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 19–20.

80. Поліщук В. М. Біотехнологічні основи виробництва біогазу. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 25–26.

81. Поліщук В. М. Оптимізація параметрів і режимів продукування біогазу. Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалив в АПК: Міжнародна науково-практична конференція в рамках XXVIII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО-2016», м. Київ, 8–11 червня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 124–126.

82. Поліщук В. М. Технологія замкнутого циклу переробки відходів з виробництвом біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVII Міжнародна наукова конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 35–37.

83. Поліщук В. М. Визначення впливу параметрів розпилювача на лужність біодизеля при його нейтралізації. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVII Міжнародна наукова конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 37–38.

84. Поліщук В. М. Метод визначення теплової цінності біогазу. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVII Міжнародна наукова конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 38–40.

85. Поліщук В. М. Дослідження параметрів і режимів аерозольного промивання біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVII Міжнародна наукова конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 40–42.

86. Поліщук В. М. Собівартість виробництва біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVII Міжнародна наукова конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 42–43.

87. Поліщук В. М. Особливості охорони праці на виробництві біопалива. Раціональне використання енергії в техніці: XIII Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 травня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 179–182.

88. Поліщук В. М. Визначення раціональних параметрів і режимів аерозольного промивання біодизеля. Сучасні технології аграрного

виробництва: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 56–58.

89. Іщенко Ю. М., **Поліщук В. М.** Обґрунтування технології та вибір обладнання анаеробного зброджування відходів тваринництва з розробкою заходів охорони праці. Сучасні технології аграрного виробництва: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 64–65. *(Здобувачем проведено обґрунтування технології та вибір обладнання для анаеробного зброджування відходів тваринництва).*

90. Науменко О. В., **Поліщук В. М.** Удосконалення лінії виробництва паливних гранул ПП «Малинська меблева фабрика». Сучасні технології аграрного виробництва: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 90–92. *(Здобувачем досліджено сировинну базу та описано удосконалення лінії виробництва паливних гранул ПП «Малинська меблева фабрика»).*

91. Тимошенко І. О., **Поліщук В. М.** Сировинна база для виробництва паливної тріски з відходів лісозаготівлі в ДП «Димерське лісове господарство». Сучасні технології аграрного виробництва: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 листопада 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 95–98. *(Здобувачем досліджено сировинну базу для виробництва паливної тріски з відходів лісозаготівлі в ДП «Димерське лісове господарство»).*

92. Поліщук В. М. Обґрунтування вибору методики визначення якості очищення біодизеля від лужного каталізатора. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 26–30 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 98–100.

93. Поліщук В. М. Методика визначення лужності біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 26–30 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 100–103.

94. Поліщук В. М. Експериментальні дослідження нейтралізації метилового ефіру шляхом його перемішуванні з водним розчином лимонної кислоти. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 26–30 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 103–105.

95. Поліщук В. М. Експериментальні дослідження нейтралізації метилового ефіру шляхом розпилення на нього водного розчину лимонної кислоти. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 26–30 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 105–106.

96. Поліщук В. М. Експериментальні дослідження об'ємного промивання метилового ефіру. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 26–30 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 106–107.

97. Romaniuk W., **Polishchuk V. M.**, Rogovskii I. L., Marczuk A. Influence of sludge of biogas production on yield and sustainability of crop production. Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції в АПК: VI Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 6–9 червня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 67–68. *(Здобувачем наведено результати проведених експериментальних досліджень та надано рекомендації щодо використання рідкого дигестату для підвищення урожайності та екологічності продукції овочівництва).*

98. Поліщук В. М. Експериментальне дослідження аерозольного промивання метилового ефіру. Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2018: XIV Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 19–22 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 16–17.

99. **Поліщук В. М.**, Науменко В. О., Науменко О. В. Нова технологічна лінія виробництва паливних гранул із відходів деревообробки і меблевого виробництва на ПП «Малинська меблева фабрика». Сучасні проблеми землеробської механіки: XIX Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 жовтня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 299–300. *(Здобувачем обґрунтовано технологію виробництва паливних гранул із відходів деревообробки і меблевого виробництва на ПП «Малинська меблева фабрика»).*

100. **Polishchuk V. M.**, Golopura S. M., Styrankevych G. R. National-economy application of diesel biofuels. Сучасні проблеми землеробської механіки: XIX Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 жовтня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 305–306. *(Здобувачем проведено аналіз біопалива для дизельних двигунів).*

101. **Поліщук В. М.**, Литвин О. О. Ефективність використання твердого біопалива в Україні. Сучасні технології аграрного виробництва: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 жовтня – 1 листопада 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 82–83. *(Здобувачем досліджено ефективність використання твердого біопалива в Україні).*

102. **Поліщук В. М.**, Василенко Є. А. Вузол аерозольного промивання біодизеля. Сучасні технології аграрного виробництва: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 жовтня – 1 листопада 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 86–87. *(Здобувачем обґрунтовано конструкцію вузла аерозольного промивання біодизеля).*

103. **Поліщук В. М.**, Литвин О. О. Боротьба з пилоутворенням в цеху з виробництва деревних паливних гранул. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987), м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 259–260. *(Здобувачем*

*досліджено способи боротьби з пилоутворенням в цеху з виробництва деревних паливних гранул).*

104. Поліщук В. М. Використання кисломолочної сироватки в якості косубстрату для метанового зброджування гною ВРХ. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987), м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 114–116.

105. Поліщук В. М. Експериментальне дослідження пінного промивання метилового ефіру. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XIX Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 25–29 березня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 30–31.

106. Поліщук В. М. Теоретичні основи промивання біодизеля. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XIX Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 25–29 березня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 31–34.

107. Поліщук В. М. Концепція комплексного виробництва і використання біопалив в господарстві. Біоенергетичні системи: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Житомир, 3–5 травня 2019 року: тези доповіді. Житомир, 2019. С. 46–50.

108. Шворов С. А., Поліщук В. М., Мірошник В. О., Давиденко Т. С. Методичні засади побудови інтелектуальної системи керування процесами зброджування енергетичних культур у біогазових комплексах. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): VIII Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 20–24 травня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 60–61. *(Здобувачем здійснено імітаційне моделювання функціонування метантенка біогазової установки та встановлено оптимальні режими дозування косубстратів).*

## АНОТАЦІЯ

**Поліщук В. М. Теоретичне та експериментальне обґрунтування техніко-технологічної системи виробництва і використання біопалива у сільському господарстві.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми розроблення моделей і методів техніко-технологічного обґрунтування системи виробництва і використання біопалив у сільському господарстві. Для вирішення даної проблеми вибрано основні методи і методики теоретичних та

експериментальних досліджень, розроблено моделі процесів, які відбуваються при очищенні біодизеля, метановому зброджуванні та гранулюванні біомаси.

Розроблено математичну модель системи аерозольного промивання біодизеля, яка дозволяє шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь визначати параметри системи промивання. Розроблено наукові основи обґрунтування вимог до систем підготовки та дозування сировини в біогазовій установці, що включає: експериментальне визначення максимального виходу біогазу при періодичному завантаженні субстрату; розроблення та використання математичної моделі функціонування біогазової установки для отримання залежностей виходу біогазу при поступовому режимі завантаження; обґрунтування оптимальних параметрів дозування косубстратів за допомогою методу градієнтного спуску. Розроблено метод обґрунтування техніко-технологічних вимог до системи підготовки субстрату шляхом встановлення оптимальних обсягів дозування сировини, що дає можливість обґрунтувати конструктивні параметри обладнання для приготування і дозування різних видів косубстратів. Удосконалено математичну модель функціонування біогазової установки, в якій, на відміну від відомих моделей, враховуються втрати поживних речовин, які бактерії переробляють і використовують на виробництво біогазу, що дає можливість врахувати більшу кількість факторів при прогнозуванні виходу біогазу. Удосконалено концепцію функціонування агробіоінженерної системи з виробництвом і переробкою сільськогосподарської продукції шляхом впровадження технологій та комплексу машин і обладнання виробництва дизельного і гранульованого біопалива та біогазу, яка відрізняється від відомих тим, що сировиною для виробництва біогазу є відходи біодизельного і крохмального виробництв та молокопереробки, для виробництва паливних гранул і брикетів – відходи сільськогосподарського виробництва, що дає можливість збільшити прибуток господарства та вирішити проблему утилізації відходів.

**Ключові слова:** обладнання, біопаливо, біомаса, біодизель, метиловий ефір, реактор, біогаз, метантенк, біогазова установка, субстрат, дозування, гранулятор, ущільнення, концепція.

## АННОТАЦИЯ

**Полищук В. Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование технико-технологической системы производства и использования биотоплива в сельском хозяйстве.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы разработки моделей и методов обоснования требований к машинам и оборудованию для комплексного производства и использования биотоплива. Для решения данной проблемы выбраны основные методы и методики

теоретических и экспериментальных исследований, разработки модели процессов, которые происходят при очистке биодизеля, метановом сбраживании и гранулировании биомассы.

Проведен анализ современного состояния мирового и отечественного топливно-энергетического комплекса; рассмотрены характеристики известного биотоплива, технологии и технические средства их производства и использования. Осуществлена оценка современного состояния сельскохозяйственного производства в Украине, проведен анализ существующих концепций комплексного производства и использования биотоплива в Украине и в мире. Сделан обзор теоретических и экспериментальных исследований процессов промывки биодизеля, генерирования биогаза и гранулирования биомассы. Разработаны математические модели процессов аэрозольной очистки биодизеля в реакторе, метанового сбраживания биомассы в метантенке с генерированием биогаза, уплотнения биомассы с помощью узла гранулирования с кольцевой матрицей, определены конструктивно-технологические параметры узла гранулирования для производства топливных гранул из биомассы.

Согласно разработанным программам и методикам проведены экспериментальные исследования технологий и режимов очистки биодизеля, установлены оптимальные режимы работы системы дозирования при загрузке косубстрата в метантенк биогазовой установки, определена насыпная плотность сырья для производства топливных гранул из биомассы. По результатам проведения экспериментальных исследований выбраны лучшие технологии для нейтрализации и промывки биодизеля, установлены оптимальные параметры работы оборудования, разработана классификация сырья по выходу биогаза, которую можно использовать при выборе оборудования биогазовых установок, определены рациональные и оптимальные параметры дозирования косубстрата, установлена насыпная плотность сырья для производства топливных гранул из биомассы.

Усовершенствована концепция функционирования агробиотехнологической системы с производством и переработкой сельскохозяйственной продукции путем внедрения технологий и комплекса машин и оборудования производства дизельного и гранулированного биотоплива и биогаза, которая отличается от известных тем, что сырьем для производства биогаза являются отходы биодизельного и крахмального производств и молокопереработки, для производства топливных гранул и брикетов – отходы сельскохозяйственного производства, что дает возможность увеличить прибыль хозяйства и решить проблему утилизации отходов.

**Ключевые слова:** оборудование, биотопливо, биомасса, биодизель, метиловый эфир, реактор, биогаз, метантенк, биогазовая установка, субстрат, дозирование, гранулятор, уплотнение, концепция.

## ANNOTATION

**Polishchuk V. M. Theoretical and Experimental Justification of Technical and Technological System of Production and Use of Biofuels in Agriculture. – The Manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.05.11 «Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of developing models and methods of technical and technological substantiation of the system of production and use of biofuels in agriculture. In order to solve the problem, the main methods and techniques of theoretical and experimental research, development of the model of processes that occur during the process of clearing biodiesel, methane fermentation and granulation of biomass are selected.

A mathematical model of the system of aerosol washing of biodiesel has been developed, which allows us to determine the parameters of the flushing system by solving the system of differential equations. The scientific basis of the substantiation of requirements for the systems of preparation and dosing of raw materials in the biogas plant is developed, which includes the experimental determination of the maximum yield of biogas during periodic loading of the substrate, the development and use of a mathematical model of the functioning of the biogas plant for obtaining the dependences of the biogas output in a gradual mode of loading, and the justification by the method gradient descent of optimal dosing parameters of kosubstrates. The method of substantiation of technical and technological requirements to the system of substrate preparation by the development of a classifier of optimal amounts of raw materials is developed, which makes it possible to substantiate the design parameters of equipment for preparation and dosage of different types of kosubstrates. An improved mathematical model of the functioning of a biogas plant, in which, unlike the known models, losses of nutrients, which bacteria are processed in support of their own life and production of biogas, are taken into account, which makes it possible to take into account a greater number of factors when forecasting biogas output. The concept of development of rural areas with the introduction of a system of technologies, machines and equipment for the production and use of biofuels has been further developed, in which the biodiesel and starch production waste and processing milk are used for the production of biogas, for the production of fuel pellets and briquettes – agricultural waste that gives the opportunity to increase the profit of the economy and solve the problem of waste utilization.

**Key words:** equipment, biofuel, biomass, biodiesel, methyl ether, reactor, biogas, methane tank, biogas plant, substrate, dosing, granulator, compaction, concept.

Підписано до друку 15.11.19  
Ум. друк. арк. 1,9  
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16  
Обл.-вид.арк. 1,9  
Зам. № 191065

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041  
тел.: 527-81-55





