

УДК 620.952:662767.2

С. М. Кухарець¹

к.т.н.

Г. А. Голуб²

д.т.н.

О. В. Скидан¹

д.е.н.

О. Ю. Осипчук¹

аспірант*

¹Житомирський національний агроєкологічний університет

²Національний університет біоресурсів і природокористування України

ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ ІЗ СИРОВИНИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ

Відповідно до запропонованої технологічної схеми модульної біогазової установки розглядаються нові технічні рішення у системі перемішування реагуючого субстрату в метановому реакторі, які полягають у використанні зміни напрямку дії гравітаційних сил, що впливають на переміщення легкої і важкої фракції біомаси, що заповнюють циліндричний внутрішній обертовий корпус з діаметрально виконаною перегородкою.

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

Запропоновано обладнання для виробництва дизельного біопалива, що забезпечує зменшення витрат енергії на перемішування та спрощення конструкції обладнання при забезпеченні необхідних показників якості дизельного біопалива.

Встановлено, що собівартість виробництва електроенергії із використанням біореакторів обертового типу лежатиме в діапазоні від 0,34 грн/кВт-год до 0,90 грн/кВт-год. Проведене техніко-економічне обґрунтування ефективності використання котлів із верхнім горінням дозволило встановити, що питомі витрати отримання тепла складають для котла із верхнім горінням 30 грн/ГДж. Собівартість виробництва дизельного біопалива складе від 12172 грн/тону до 12886,7 грн/тону.

Ключові слова: агроєкосистема, біогаз, дизельне біопаливо, солома, спалювання, циркуляція, змішування, горіння, ефективність, технологія, параметри, котел, реактор, метантенк.

Постановка проблеми

Основні завдання функціонування сільськогосподарського виробництва такі [1, 2, 3]:

- забезпечення населення продуктами харчування, або продовольче завдання;

© С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, О. В. Скидан, О. Ю. Осипчук

* Науковий керівник – доктор с.-г. наук С. М. Кухарець

- забезпечення технологічних процесів та побуту енергетичними ресурсами, енергетичне завдання;

- утримання біологічного розмаїття форм життя й збереження навколишнього середовища, екологічне завдання.

Проте, комплексне вирішення завдань функціонування агроєкосистем є науковою проблемою, яке полягає у подоланні протиріччя в тому, що збільшення виробництва продуктів споживання (вирішення першого завдання) та збільшення виробництва енергії (вирішення другого завдання), призводить до погіршення екологічного стану агроєкосистеми, що, у першу чергу, виражається в дегуміфікації ґрунтового середовища (невирішення третього завдання). Тому, сільськогосподарська діяльність повинна розвивати ефективні методи раціонального землекористування та «безвідходних технологій» для задоволення як продовольчих, так і енергетичних потреб. Це дозволить, в умовах дефіциту в Україні традиційних джерел енергії, підвищити енергетичну забезпеченість сільськогосподарських підприємств. Одним із напрямів підвищення енергетичної ефективності в сільськогосподарському виробництві є зниження частки непоновлюваних джерел і підвищення – поновлюваних. А саме – використання джерел енергії, до яких належать сонячна, вітрова, геотермальна енергія, енергія хвиль та приливів, гідроенергія, енергія біомаси, газу з органічних відходів, каналізаційно-очисних станцій тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для України найбільш можливими та актуальними відновлюваними джерелами енергії є: енергія сонця, енергія вітру, гідроенергія (енергія малих річок), енергія біомаси, «вторинні джерела енергії» (побутові та промислові відходи). Враховуючи природні фактори, зокрема кліматичні умови, температурний режим, можливий висновок, що в Україні наразі застосування таких відновлюваних джерел енергії, як сонячна енергетика та енергія вітру, є досить складним у силу технічних та економічних причин. Так, сонячна енергетика відноситься до найбільш матеріалоемних видів енергії, а отримання вітрової енергії передбачає встановлення обладнання на досить великій території. Крім того, при використанні даних видів енергії неоліком є значна циклічність виробництва [4, 5, 6].

Більшого поширення в Україні набула гідроенергетика. Проте більшість малих гідроелектростанцій, які б могли забезпечувати електроенергією сільське господарство, побудовані ще у середині ХХ століття й на нині потребують вкладення значних грошових ресурсів на відновлення їх продуктивності. Крім того, існує проблема висихання та заболочення малих річок, що призводить до зменшення можливого використання річок для гідроенергетики.

Потенціал біомаси як відновлюваного джерела енергії в Україні досить великий. Земельні ресурси, які можуть бути використані для виробництва

біомаси, в Україні є більшими, ніж у країнах ЄС, разом узятих [7, 8]. Одним з основних шляхів скорочення споживання природного газу в Україні може стати широке застосування технологій виробництва енергії з місцевих видів органічної сировини, зокрема таких, як біомаса [9]. Біомасу можна розглядати як вуглецевомісткі речовини органічного походження (деревина, солома, рослинні залишки, енергетичні культури тощо), що можуть використовуватися як паливо для виробництва енергії. Для цього необхідне застосування сучасних технологій для конверсії вихідної біомаси у сучасні та зручні для споживання види енергоносіїв (такі, як електроенергія, рідке й газоподібне паливо), а також ефективне використання твердого палива.

Мета, завдання та методика досліджень

Метою публікації є обґрунтування методів отримання енергії із сировини сільськогосподарського походження на основі агропромислових технологій із використанням адаптованого енергоефективного обладнання. Задачею дослідження є визначення ефективності використання розроблених нами технологій та обладнання для отримання енергії. Для вирішення поставленої задачі необхідно скористатися методикою конструювання елементів забезпечення енергетичної автономності агроєкосистеми із наслідуванням властивостей структури агроєкосистеми.

Результати досліджень

Виробництво біогазу є ефективною технологією, що зумовлюється наявністю значного сировинного потенціалу як у рослинництві, так і тваринництві [2, 5, 8]. За технологічну основу виробництва біогазу нами прийнято процес метаногенезу біосировини з добовим об'ємом до 300 м³, температурним режимом 38–55 °С, яка має кислотність 6,5–7 од., вологість 90–95%, фракційний склад з максимальним розміром твердих складових до – 30 мм, допустиме відхилення температури в анаеробному реакторі в межах ± 2 °С, дозі добового завантаження – 10 %, яке здійснюється кожні 2 год., та експозиції анаеробного зброджування від 10 до 20 діб залежно від вибраного температурного режиму зброджування [10].

У запропонованій нами модульній біогазовій установці [10, 11] (рис. 1, 2) перемішування реагуючого субстрату в метановому реакторі відбувається завдяки зміні напрямку дії гравітаційних сил, які впливають на переміщення легкої і важкої фракції біомаси, що заповнюють внутрішній обертовий корпус, виконаний у вигляді циліндра з діаметрально виконаною перегородкою. Метантенк обертається у рідині, яка знаходиться в зовнішньому корпусі. Така конструкція створює підймальну силу для обертового біореактора, розвантажуючи опорні цапфи, що зменшує сили тертя в них і, відповідно, зменшує енергію, яка витрачається на обертання і перемішування завантаженої біомасою конструкції.

Для недопущення розшарування біомаси та забезпечення її перемішування завдяки підняттю мінеральної складової біомаси, яка накопичується у нижній частині метантенка, й занурення органічної складової біомаси, що накопичується у верхній частині метантенка, необхідно мати значення переміщення та відносної швидкості частинок біомаси на перемішуючих лопатках обертового метантенка (рис. 1).

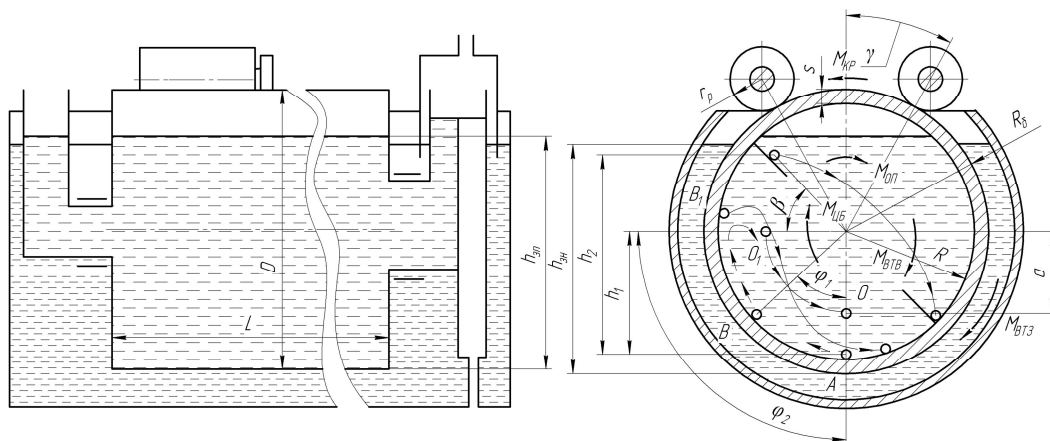


Рис. 1. Структурна схема обертового реактора:

D – внутрішній діаметр реактора, м; L – робоча довжина реактора, м; $M_{кр}$ – крутний момент для забезпечення обертання реактора, Н·м; $M_{оп}$ – момент опору підшипникових вузлів, Н·м; $M_{втз}$ – момент в'язкого тертя зовнішньої поверхні реактора об рідину, в яку занурено реактор, Н·м; $M_{втв}$ – момент в'язкого тертя внутрішньої поверхні реактора об рідину біомасу, яка перебуває у реакторі, Н·м; $M_{цб}$ – момент, необхідний для забезпечення циркуляції біомаси у реакторі, Н·м; h_1 – висота підняття біомаси під дією сил тертя, м;

h_2 – висота підняття біомаси лопатками, м; $h_{зн}$ – висота заповнення реактора

біомасою, м; $h_{зн}$ – глибина занурення реактора, м; s – товщина стінки реактора, м;

R – внутрішній радіус біореактора, м; R_B – зовнішній радіус біореактора, м; r – радіус ролика, м; a – відстань від осі реактора до частинки біомаси після однієї циркуляції, м; γ – кут установлення привідних роликів, рад; ϕ_1 – теоретичний кут підняття частинки біомаси, град; ϕ_2 – дійсний кут підняття частинки біомаси, град; β – кут тертя між біомасою та матеріалом біореактора, рад.

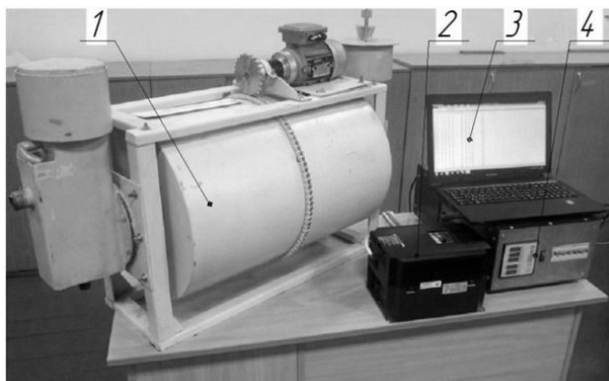


Рис. 2. Комплект обладнання для проведення дослідження енергетичної ефективності перемішування субстрату (зовнішній корпус не показано):
1 – обертювий метантенк; 2 – частотний перетворювач; 3 – реєстратор;
4 – цифровий вимірювальний пристрій.

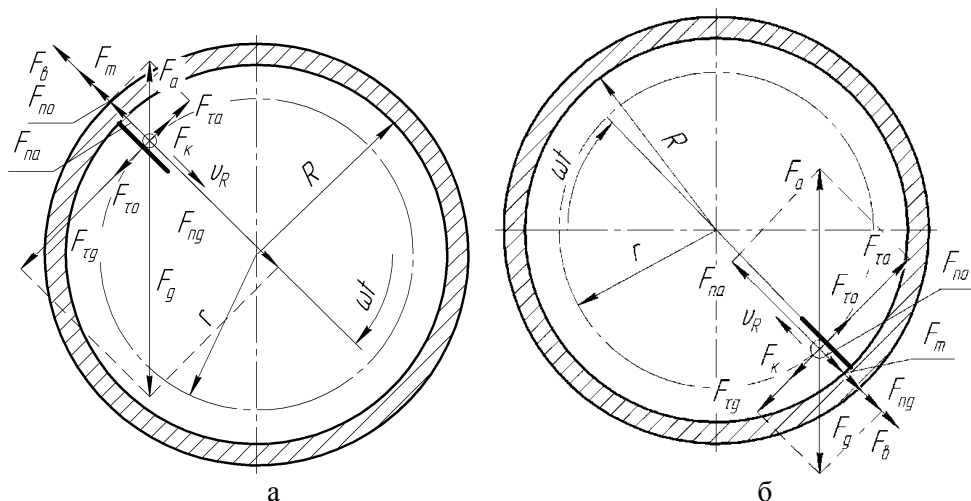


Рис. 3. Схема дії сил на мінеральні (а) та органічні (б) частинки субстрату:

F_g – сила тяжіння, Н; F_a – сила Архімеда, Н; F_m – сила тертя, Н; F_k – коріолісова сила інерції, Н; F_{ϵ} – відцентрова сила інерції, Н; F_{to} – сила, що притискує частинку до лопатки завдяки опору субстрату, Н; F_{no} – сила опору субстрату, яка протидіє руху частинки у радіальному напрямку, Н; r – поточний радіус положення частинки субстрату, м; v_R – відносна швидкість органічної частинки під час руху по лопатці, м/с; R – внутрішній радіус метантенка, м; ωt – кут повороту метантенка, рад

Диференційні рівняння руху частинок субстрату по лопатках обертового метантенка мають такий вигляд:

– для мінеральних частинок субстрату

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega - k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 + fk_1\omega)r = g [f(1 - k_2)\cos(\omega t) + (k_2 - 1)\sin(\omega t)], \quad (1)$$

– для органічних частинок субстрату

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + (2f\omega - k_1) \frac{dr}{dt} - (\omega^2 + fk_1\omega)r = g [f(k_2 - 1)\cos(\omega t) + (1 - k_2)\sin(\omega t)], \quad (2)$$

де r – поточний радіус положення частинки субстрату, м;

f – коефіцієнт тертя частини субстрату за матеріалом лопатки метантенка,

віднос. од.;

ω – кутова швидкість обертання метантенка, c^{-1} ;

g – прискорення земного тяжіння, m/c^2 ;

t – час руху метантенка, с;

k_1 – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні органічних частинок субстратом, c^{-1} ; $k_1 = 18\eta/(\rho_c d_E^2)$;

k_2 – коефіцієнт відношення густини, $k_2 = \rho_c/\rho_4$;

ρ_c – густина субстрату, kg/m^3 ;

ρ_4 – густина частинки, kg/m^3 ;

η – динамічна в'язкість субстрату, $Pa \cdot s$;

d_E – еквівалентний діаметр, м.

Із урахуванням початкових умов при роботі обертового метантенка отримано переміщення, відносну швидкість та постійні диференційних рівнянь (3) та (4), що становлять:

– для мінеральних частинок субстрату

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} \left(\frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) + 2 \sin(\omega t) \right), \quad (3)$$

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) + \quad (4)$$

$$+ \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} (2\omega \cos(\omega t) - k_1 \sin(\omega t)),$$

$$C_1 = \frac{\Delta_{C_1}}{\Delta} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\left(R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + \frac{2\omega k_3}{\lambda_2} \right], \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\Delta_{C_2}}{\Delta} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{k_1 k_3}{\omega} - \frac{2\omega k_3}{\lambda_1} - R \right); \quad (6)$$

– для органічних частинок субстрату

$$r = C_1 \exp(\lambda_1 t) + C_2 \exp(\lambda_2 t) + \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} \left(2 \sin(\omega t) - \frac{k_1}{\omega} \cos(\omega t) \right), \quad (7)$$

$$v_R = \frac{dr}{dt} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t) +$$

$$+ \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)} (2\omega \cos(\omega t) + k_1 \sin(\omega t)), \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\Delta_{C_1}}{\Delta} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\left(R + \frac{k_1 k_3}{\omega} \right) + \frac{2\omega k_3}{\lambda_2} \right], \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{\Delta_{C_2}}{\Delta} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(-\frac{2\omega k_3}{\lambda_1} - R - \frac{k_1 k_3}{\omega} \right), \quad (10)$$

$$\text{де } k_3 = \frac{g(f^2 + 1)(k_2 - 1)}{4(\omega^2 f^2 + 1) + k_1^2(f^2 + 1)}; \lambda_{1,2} = \frac{k_1}{2} - f\omega \mp \sqrt{\omega^2(f^2 + 1) + \frac{k_1^2}{4}}.$$

На основі отриманих розв'язків рівнянь встановлено, що за середньої густини субстрату $\rho_c = 1025-1050 \text{ кг/м}^3$, мінеральної частини субстрату $\rho_m = 1150-1250 \text{ кг/м}^3$ та органічної частини субстрату $\rho_o = 800-900 \text{ кг/м}^3$ раціональні значення кутової швидкості метантенка становлять $\omega = 0,035-0,08 \text{ с}^{-1}$. Довжина лопатки метантенка $l = (0,775-0,825)R$. За цих значень кутової швидкості та довжини лопатки мінеральні частинки будуть підійматися у верхню частину метантенка, після чого частинки будуть відокремлюватися від лопатки й рухатися вниз, а органічні частинки субстрату будуть занурюватися у нижню частину біореактора, після чого будуть відокремлюватися від лопатки та рухатися вгору (рис. 3), внаслідок цього буде забезпечуватися рівномірне перемішування й взаємопроникнення складових субстрату.

Оскільки верхня частина біореактора завжди буде заповнена біогазом, то внутрішні перетоки рідини у реакторі призведуть до циклічних поштовхів, які будуть порушувати статичну рівновагу обертового реактора, а також до циклічної зміни навантаження. На динаміку потужності для забезпечення циркуляції біомаси будуть впливати як параметри біомаси (щільність, в'язкість, вміст та розміри твердої фракції), так і форма внутрішньої конструкції метантенка (кількість лопаток, ступінь перекриття барабана).

Значення потужності для подолання моменту сил в'язкого тертя для зовнішньої циліндричної поверхні реактора залежить від градієнта швидкості за глибиною.

Момент опору підшипникових вузлів залежить від рівня занурення

метантенка у рідину. Без занурення момент опору підшипникових вузлів максимальний, у міру занурення він буде зменшуватися, оскільки сила Архімеда компенсуватиме вагу реактора. При подальшому зануренні момент опору підшипникових вузлів знову буде збільшуватися через перекомпенсацію ваги реактора силою Архімеда.

Загальне значення потужності для забезпечення обертання реактора, враховуючи вищенаведені складові, може бути подане у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 N_{KP} &= \omega f d_n g \times \\
 &\times \left[R_B^2 L \rho \left(\pi - \arccos \left((h_{zn} - R_B) / R_B \right) - \frac{1}{2} \sin \left(2 \arccos \left((h_{zn} - R_B) / R_B \right) \right) \right) \right. \\
 &\quad \left. - \pi \left(R^2 L \rho_B k_3 + k_k \rho_M \left((R_B^2 - R^2) L + 2 R_B^2 s \right) + R^2 L \rho_T (1 - k_3) \right) \right] + \\
 &\quad + \frac{4 L \eta \omega^2 R_B^2 R_3^2}{R_3^2 - R_B^2} \arccos \left(\frac{R_B - h_{zn}}{R_B} \right) + \\
 &\quad + \pi R^3 L \rho_B g k_3 k_{cm} \left(\frac{(1 - k) \omega}{2 \varphi_2} + \frac{k (1 + \sin \beta)}{\frac{0,5 \pi + \beta}{\omega} + \frac{R (1 + \sin \beta) \eta_B}{k_x (\rho_B - \rho_B) g r_{cp}^2}} \right) + \\
 &\quad + \frac{\pi R_B^2}{2} \left(R^2 L \rho_B k_3 + k_k \rho_M \left((R_B^2 - R^2) L + 2 R_B^2 s \right) + R^2 L \rho_T (1 - k_3) \right) \omega \frac{d\omega}{dt},
 \end{aligned} \tag{11}$$

де N_{KP} – потужність для забезпечення обертання реактора, Вт;

ω – кутова швидкість обертання реактора, c^{-1} ;

$d\omega/dt$ – кутове прискорення обертання реактора, c^{-2} ;

L – довжина біореактора, м;

R – внутрішній радіус біореактора, м;

R_B – зовнішній радіус біореактора, м;

R_3 – внутрішній радіус зовнішнього, заповненого рідиною корпусу, м;

d_{II} – діаметр цапфи підшипника, м;

s – товщина стінки реактора, м;

h_{zn} – глибина занурення реактора, м;

β – кут тертя між біомасою та матеріалом біореактора, рад;

φ_2 – дійсний кут піднімання елементарної частинки біомаси внаслідок

взаємодії з іншими частинками біомаси, рад;

η_B – динамічна в'язкість біомаси у реакторі, Па·с;

η – динамічна в'язкість рідини, в яку занурено реактор, Па·с;

r_{cp} – середній розмір твердої частинки біомаси, м;

ρ_B' – щільність твердої фракції біомаси, кг/м³;

ρ_B – щільність біомаси, кг/м³;

ρ_m – об'ємна маса матеріалу, із якого виготовлено реактор, кг/м³;

ρ_G – щільність біогазу, кг/м³;

ρ – щільність рідини, в яку занурено біореактор, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

f – коефіцієнт тертя кочення;

k_3 – коефіцієнт заповнення біореактора біомасою;

k_{cm} – коефіцієнт вмісту у біомасі сухої маси;

k – коефіцієнт, що характеризує ступінь впливу лопаток на перемішування біомаси в обертовому реакторі;

k_k – конструкційний коефіцієнт, що враховує збільшення ваги біореактора завдяки додатковим конструкційним елементам (лопаток та ін.).

Розв'язок рівняння (11) дає змогу встановити параметри, за яких витрати енергії на обертання метантенка будуть мінімальні.

На основі виконаних аналітичних досліджень можна зауважити, що коефіцієнт заповнення метантенка збільшується у міру збільшення внутрішнього радіуса реактора від 0,5 до 2,15 м у діапазоні від 0,89 до 0,946. Значення раціонального радіуса метантенка ($R = 2,15$ м), що забезпечує мінімальні енерговитрати ($N = 6912$ Вт) на обертання метантенка, у широкому діапазоні коефіцієнта завантаження ($k_3 = 0,8 \div 0,946$) є граничним максимальним значенням цього параметра завдяки узгодженню динаміки зміни потужностей на перемішування біомаси $N_{цб}$ та подолання опору підшипників $N_{оп}$. Подальше збільшення радіуса реактора недоцільне із конструкційних і економічних міркувань та не гарантує отримання оптимального значення коефіцієнта завантаження.

У результаті розв'язку вищенаведених рівнянь встановлено параметри біореакторів (табл. 1), що забезпечують перемішування реагуючого субстрату у всьому його об'ємі із мінімальними енерговитратами і ліквідують можливість створення плаваючої органічної частини та зануреного мінерального осаду [11].

Таблиця 1. Рациональні параметри обортових біореакторів

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

Також нами розроблено та вперше в Україні запатентовано конструкції котлів [12, 13, 14] із верхнім горінням (рис. 4, 5). В котлах потужністю P_k до 70 кВт можливе використання січки соломи, а в котлах більшої потужності ($P_k=80\dots 200$ кВт) рулонів соломи.

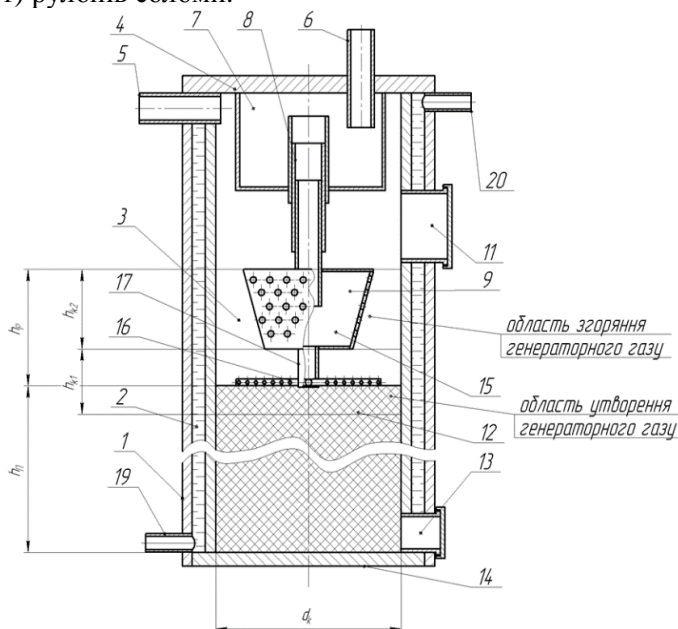


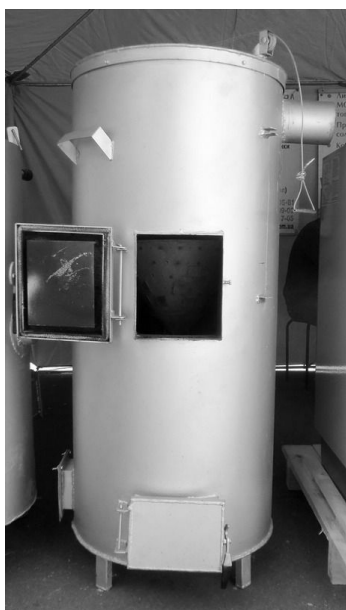
Рис. 4. Схема котла із верхнім горінням для спалювання соломи:

1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – камера згоряння; 4 – кришка; 5 – патрубок для видалення продуктів згоряння; 6 – патрубок для подачі повітря; 7 – проміжна ємкість; 8 – напрямна; 9 – розподільник повітря; 10 – отвори; 11 – дверцята для палива; 12 – паливо; 13 – дверцята для попелу; 14 – днище; 15 – верхня секція розподільника повітря; 16 – нижня секція розподільника повітря; 17 – з'єднувач; 18 – трубчасті елементи; 19 – патрубок для подачі холодної води; 20 – патрубок для відведення гарячої води; d_K – діаметр котла; $h_{п}$ – висота палива; h_p – висота розпилювача повітря; h_{K1} – висота області утворення генераторного газу; h_{K2} – висота області згоряння генераторного газу.

Згідно з проведеними нами дослідженнями, у першій області котла утворюється повітряний газ, що складається з оксиду вуглецю і азоту. Крім того, при подачі у котел повітря, яке містить водяну пару, утворюється змішаний газ (суміш H_2 , CO , CO_2 , CH_4 та N_2). У другій області котла відбувається згоряння отриманого газу. Нами розроблено та впроваджено у виробництво котли (табл. 2) для спалювання рослинної біомаси.

Таблиця 2. Раціональні параметри котлів із верхнім горінням

Теоретична теплова потужність $P_{\text{теп}}$ кВт	Витрати біомаси за добу $G_{\text{б}}$, кг	Загальні витрати повітря $V_{\text{впв}}$, м ³ /с	Кількість завантажень $n_{\text{зав}}$	Діаметр топки $D_{\text{тк}}$, м	Висота топки $H_{\text{тк}}$, м	Висота загальна $H_{\text{к}}$, м	ККД $\eta_{\text{к}}$	Робоча теплова потужність $P_{\text{рп}}$ кВт	Потужність вентилятора подачі повітря $P_{\text{впв}}$ Вт
10	66,7	0,00369	3	0,48	2,05	2,41	90	9	46
20	133,3	0,00738	3	0,72	1,82	2,23	90	18	92
40	266,7	0,01477	4	0,72	2,73	3,51	90	36	185
60	400,0	0,02215	4	0,96	2,30	3,17	90	54	277
80	533,3	0,02954	3	1,3	1,20	2,12	91	72,8	369
100	666,6	0,03692	4	1,3	1,20	2,36	91	91	462
150	999,9	0,05538	2	1,6	2,40	3,85	91	136,5	692
200	1333,3	0,07384	3	1,6	2,40	4,34	91	182	923



а)



б)

Рис. 5. Котли із верхнім горінням КГВ-20 (а) та КГВ-60 (б)

Пропоновані котли за рахунок використання удосконаленої конструкції розсіювача повітря, що дозволяє збільшити площу горіння палива із збереженням стабільної подачі повітря в зону утворення генераторного газу, а також забезпечити ефективне спалювання горючих газів за рахунок подачі додаткового повітря в камеру згорання котла, дозволяють підвищити віддачу тепла порівняно із прямим спалюванням на 10–20 % [13, 14].

Також ми пропонуємо обладнання для виробництва дизельного біопалива, що забезпечує зменшення витрат енергії, на перемішування та спрощення конструкції установки (рис. 5, 6) й технологічного процесу при забезпеченні необхідних показників якості дизельного біопалива.

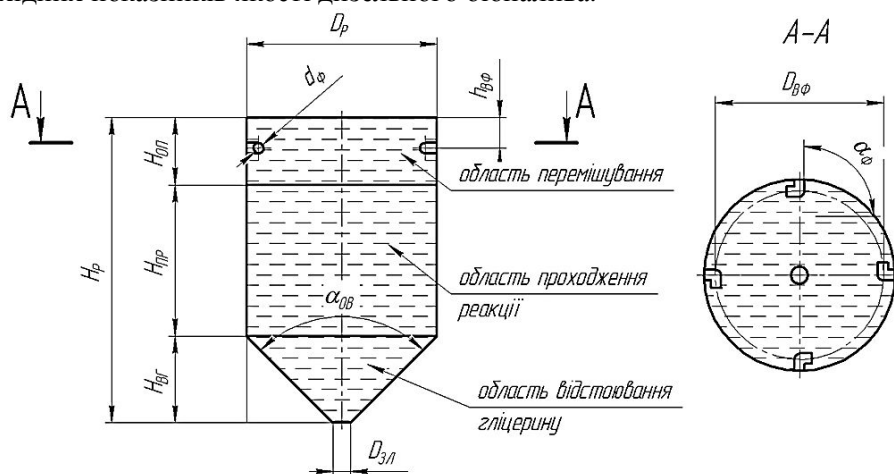


Рис. 6. Структурна схема циркуляційного змішувача-розділювача:

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

Завдяки тому, що форсунки встановлено у корпусі циркуляційного розділювача (рис. 13) на одному рівні за висотою і орієнтовано так, щоб при перекачуванні емульсії утворювати турбулентний потік емульсії у його верхній частині, забезпечується рівномірне пошарове перемішування емульсії у зоні розміщення форсунок. При відкачуванні емульсії з нижньої частини циркуляційного розділювача перемішаний шар емульсії опускається нижче, забезпечуючи перебіг реакції етерифікації в умовах меншого рівня турбулізації суспензії, і завдяки цьому досягається підвищення якості дизельного біопалива.

У результаті проведених досліджень встановлено параметри ряду гідродинамічних розділювачів [15].

Таблиця 3. Раціональні параметри циркуляційних змішувачів-розділювачів

Параметр	Внутрішній діаметр посудини D_p , м					
	0,8	1,2	1,4	2,2	3	3,2
Номінальний об'єм V_p , м ³	0,4	1	2	10	50	63
Діаметр встановлення форсунок $D_{вф}$, м	0,74	1,12	1,31	2,09	2,88	3,06
Діаметр сопла форсунки d_f , мм	30	35	30	30	30	30
Висота розділювача H_p , м	0,95	1,12	1,57	3,05	7,65	8,45
Висота встановлення форсунок $h_{вф}$, м	30	41	43	53	61	68
Кількість форсунок n_f , шт	4	4	4	4	4	4
Тиск у форсунці P_f , МПа	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Подача насоса $Q_{нас}$, м ³ /с	0,0061	0,0083	0,0087	0,0106	0,0123	0,0137
Теоретична потужність насосу W_T , Вт	61,3	83,4	173,4	318,6	490,5	685,5
Час одного циклу перемішування $\tau_{ц}$, с	65	120	230	944	4065	4600
Продуктивність $P_{двп}$, м ³ /год	0,03	0,08	0,16	0,81	4,05	5,10

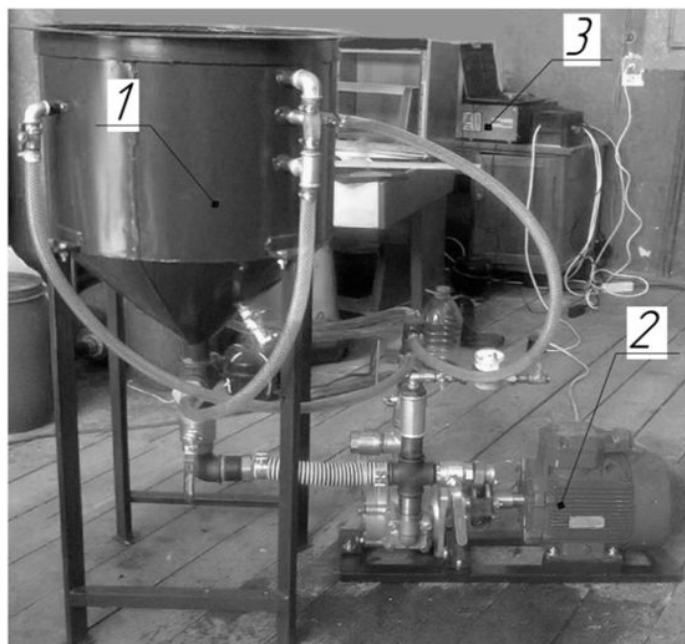


Рис. 7. Комплект обладнання для дослідної перевірки енергетичної ефективності виробництва дизельного біопалива у циркуляційних змішувачах:

1 – циркулярний змішувач; 2 – гідростанція; 3 – блок апаратури

Також у наших дослідженнях [9, 16, 17, 18] встановлено доцільність використання розроблених технологічних процесів та обладнання для виробництва біометану на основі обертових метантенків, спалювання соломи у котлах із верхнім горінням та виробництва дизельного біопалива на основі циркуляційних змішувачів, що дає змогу в агроecosystemі, яка складається із блоків виробництва продукції рослинництва, тваринництва, птахівництва, аквакультури, грибівництва, блоку виробництва органічних добрив на основі соломи, гною і посліду для забезпечення балансу гумусу та блоку виробництва біопалива, за урожайності озимої пшениці до 30 ц/га отримати рівень забезпечення електроенергією до 17,3 % і повністю забезпечити потреби у тепловій енергії та рідкому біопаливі.

Висновки та перспективи подальших досліджень

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

Розроблено математичну модель надходження повітря до зони газифікації та згорання котла із верхнім горінням, що пов'язує теплову потужність із аеродинамічним опором розподільника повітря, витратами повітря через нього та його геометричними параметрами. Встановлено, що витрати повітря при спалюванні соломи на 1 кВт теплової потужності котла становлять від $3,53 \cdot 10^{-4}$ до $3,69 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Надходження повітря у котел для утворення генераторного газу становить від 22,4 до 31,6 % та на спалювання газу від 77,6 до 68,4 % від загального об'єму повітря.

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

Встановлено, що собівартість виробництва електроенергії із використанням біореакторів обертового типу складе: для зерно-тваринницьких підприємств від 0,41 грн/кВт·год. до 0,90 грн/кВт·год., для зерно-свинарницьких підприємств від 0,44 грн/кВт·год. до 0,72 грн/кВт·год., для зерно-тваринницьких підприємств від 0,34 грн/кВт·год. до 0,83 грн/кВт·год. (1000 га ріллі). При чому, перевищення ціни органічних добрив на виході з біогазової установки над ціною біомаси на вході в установку складе: для гною – 6 %, посліду – 1 %.

Проведене техніко-економічне обґрунтування ефективності використання котлів із верхнім горінням дозволило встановити, що питомі витрати отримання тепла складають для котлів, яке працюють на рулонах соломи RAU2-600M (теплова потужність $P_k=860$ кВт) – 33,2 грн/ГДж та RAU2-331M ($P_k=300$ кВт) – 37,4 грн/ГДж, для котла, що працює на природному газі КВГ-200 ($P_k=200$ кВт), – 115,0 грн/ГДж (базовий варіант). Для котла із верхнім горінням, що працює на січці соломи КВГ-20 ($P_k=20$ кВт), – 30,1 грн/ГДж, а для котла із верхнім горінням, що працює на рулонах КВГ-200 ($P_k=200$ кВт), – 30 грн/ГДж.

Таким чином, ефективність пропонованих котлів із верхнім горінням на 74% вища, ніж у котлів, що працюють на природному газі (за рахунок використання дешевшого палива), та на 10,4–19,9 % вище, ніж у традиційних котлів, що працюють на соломі (за рахунок підвищення ефективності спалювання палива).

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

Приймаючи ринкову вартість дизельного пального $V_{pd}=16000$ грн/т, річний прибуток становитиме від $\Pi_d=165$ грн/га до $\Pi_d=206$ грн/га, рівень рентабельності виробництва дизельного біопалива складе від $P_d=16,9\%$ до $P_d=22,0\%$.

Зважаючи на високу ефективність обладнання адаптованого до агропромислових технологій виробництва енергії, можливе використання методики конструювання елементів агроєкосистеми із наслідуванням властивостей структури агроєкосистеми для широкого спектру технологічних процесів, обладнання та машин сільськогосподарського виробництва.

Література

1. Енергетична оцінка агроєкосистем: навч. посібник / О. Ф. Смаглій, А. С. Малиновський, А. Т. Кардашов [та ін.] ; за ред. О. Ф. Смаглія. – Житомир : ДАУ, 2002. – 160 с.

2. Голуб Г. А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроєкосистеми / Г. А. Голуб // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – Вип. 144, ч. 4. – С. 303–312.

3. Голуб Г. А. Техничко-технологическое обеспечение энергетической автономности агроэкосистем / Г. А. Голуб // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 19–20 окт. 2010 г.) : в 2 т. Минск, 2010. – Т. 1 – С. 24–29.

4. Концептуальные аспекты комплексного технического обеспечения экологически безопасного производства органических продуктов / В. А. Дубровин, М. Д. Мельничук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–20 октября 2011 г.) : в 3 т. – Минск : НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2011. – Т. 1 – С. 50–57.

5. Развитие биоэнергетики в Украине / В. А. Дубровин, Г. А. Голуб, С. В. Драгнев, П. Евич // The 8-th International Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes Proceedings / Industrial Institute of Agricultural Engineering (25–28-th June). – Poznan, 2013. – P. 41–47.

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

7. Кухарець В. В. Визначення основних факторів, що впливають на кількість доступної соломи для переробки / В. В. Кухарець, В. В. Сарана // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. – 2010. – Вип. 144, ч. 3. – С. 227–232.

8. Scientific bases of production and use of biofuel in agroecosystems G. Golub, V. Dubrovin, S. Kukharets [et al.] // Біоресурси планети і якість життя : електрон. журнал [Електронний ресурс]. – 2013. – Вип. 4. – Режим доступу: <http://gcheraejournal.nubip.edu.ua/index.php/ebql/article/view/146/112>.

9. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / В. О. Дубровін, Л. Д. Романчук, С. М. Кухарець [та ін.] ; відп. ред. О. В. Скидан. – К. : Центр учбової літератури, 2014. – 335 с.

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

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

12. Пат. 105346 Україна, МПК F24H 1/10, F23B 60/00. Котел водогрійний для спалювання рослинної біомаси / О. Я. Переходько, Г. А. Голуб; В. А. Дубровін; О. Н. Дімітрев, С. М. Кухарець; О. Я. Переходько . - заявка № а201310034; заявлено 12.08.2013; опубліковано 25.04.2014; Бюл. №8. – 6 с.

13. *Кухарець С. М.* Аналіз процесів утворення та горіння генераторного газу в котлах для спалювання соломи / *С. М. Кухарець* // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 2 (45), т. 4, ч. 2. – С. 336–344.

14. *Кухарець С. М.* Обґрунтування основних параметрів котлів із верхнім горінням / *С. М. Кухарець* // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. – Вип. 196, ч. 2. – С. 238–250.

15. *Кухарець С. М.* Аналіз процесу отримання біодизельного пального та обґрунтування основних параметрів реактора-розділювача / *С. М. Кухарець, Г. А. Голуб, В. М. Хрус* // Сучасні проблеми збалансованого природокористування: зб. наук. пр. до ІХ наук.-практ. конф. Спец. вип. – Кам'янець-Подільський : ПДАТУ, 2014. – С. 164–171.

16. Технологія переробки біологічних відходів у біогазових установках з обертовими реакторами / *Г. А. Голуб, О. В. Сидорчук, С. М. Кухарець* [та ін.]. – К. : НУБіП України, 2014. – 106 с.

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

18. *Кухарець С. М.* Механіко-технологічне обґрунтування параметрів обладнання для підвищення енергетичної автономності агроєкосистем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / *С. М. Кухарець*. К., 2015. 43 с.
